



TUGAS AKHIR – TM141585

RANCANG BANGUN DAN STUDI EKSPERIMEN RESPON DINAMIS MODEL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT SISTEM PONTON DENGAN TIGA BANDUL

IBRAHIM AZ
NRP 2112 105 012

Dosen Pembimbing
Ir. Yunarko Triwinarno, MT
NIP : 195106031976031002

Co.Pembimbing
Dr.Eng.Harus Laksana Guntur,ST,M.Eng
NIP : 197505111999031001

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institute Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT– TM141585

**DESIGN AND DINAMIC RESPON EXPERIMENTAL
STUDY OF AN OCEAN WAVE POWER PLANT USING
ENERGY WITH 3 PENDULUMS SYSTEM**

IBRAHIM AZ
NRP 2112 105 012

Supervisor
Ir. Yunarko Triwinarno, MT
NIP : 195106031976031002

Co.Supervisor
Dr.Eng.Harus Laksana Guntur,ST,M.Eng
NIP : 197505111999031001

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

LEMBAR PENGESAHAN

RANCANG BANGUN DAN STUDI EKSPERIMEN RESPON DINAMIS MODEL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT SISTEM PONTON DENGAN TIGA BANDUL

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada Bidang Studi Desain
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

IBRAHIM AZ

NRP. 2112 105 012

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:	
1. <u>Ir. Yunarko Triwinarno, MT</u> (NIP. 195106031976031002)	 (Pembimbing)
2. <u>Dr. Eng Harus Laksana Guntur, ST., M. Eng</u> (NIP. 197505111999031001)	 (Penguji I)
3. <u>Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT</u> (NIP. 197004121997032003)	 (Penguji II)
4. <u>Moch. Solichin, ST., MT</u> (NIP. 2100201405003)	 (Penguji III)

SURABAYA
Januari, 2015

RANCANG BANGUN DAN STUDI EKSPERIMEN RESPON DINAMIS MODEL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT SISTEM PONTON DENGAN TIGA BANDUL

Nama Mahasiswa : Ibrahim AZ
NRP : 2112 105 012
Jurusan : Teknik Mesin, FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Yunarko Triwinarno, MT.
Co.Pembimbing : Dr.Eng.Harus L.Guntur,S.T,M.Eng

Abstrak

Indonesia memiliki potensi energi gelombang laut yang luar biasa yang bisa dimanfaatkan untuk mengatasi masalah krisis energi, terutama di pulau-pulau kecil. Pembangkit listrik tenaga gelombang laut dapat menjadi salah satu alternatif solusi masalah tersebut. Tugas akhir ini mendeskripsikan rancang bangun untuk Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul agar dapat menangkap energi laut dengan optimal..

Pada tugas akhir ini akan dilakukan perancangan ulang terhadap sebuah ponton pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL) Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul dengan mengoptimalkan massa dan panjang lengan bandul pada ponton. Pembahasan dari tugas akhir ini dititik beratkan pada studi eksperimen pengaruh massa dan lengan bandul terhadap putaran yang dihasilkan. Dimana massa dan panjang lengan bandul mempengaruhi pergerakan berputarnya bandul. Sedangkan frekuensi dan amplitudo gelombang air laut yang mengenai tubuh ponton akan menyebabkan gerak naik turun (pitching). Analisa pada penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan massa bandul dan panjang lengan bandul.

Tugas akhir ini menghasilkan karakteristik putaran bandul konstan yang dihasilkan prototipe Ponton PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul akibat adanya pengaruh variasi massa, dan panjang lengan bandul. Nilai tegangan terbesar untuk variasi jumlah bandul 3 ($N=3$) pada frekuensi 13 Hz yaitu sebesar 0,83 volt dan tegangan terkecil pada jumlah bandul 1 ($N=1$) pada frekuensi 12 Hz yaitu 0,504. Nilai putaran terbesar untuk variasi jumlah bandul 3 ($N=3$) pada frekuensi 13 Hz yaitu sebesar 290 Rpm dan terkecil pada jumlah bandul 1 ($N=1$) pada frekuensi 12 Hz yaitu 180,27 Rpm .

Kata Kunci : Ponton, PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul, Massa bandul, Panjang lengan bandul, Frekuensi dan Amplitudo Gelombang air laut, Energi listrik.

DESIGN AND DINAMIC RESPON EXPERIMENTAL STUDY OF AN OCEAN WAVE POWER PLANT USING ENERGY WITH 3 PENDULUMS SYSTEM

Student Name : Ibrahim AZ
NRP : 2112 105 012
Department : Mechanical Engineering, FTI-ITS
Supervisor : Ir. Yunarko Triwinarno, MT
Co. Supervisor : Dr.Eng.Harus L.Guntur,S.T,M.Eng

Abstract

Indonesia has a great amount of ocean wave energy that can be used to solve energy crisis problem, especially in some small islands. Power Plant using ocean wave energy can be one of alternative solution for that problem. This undergraduate thesis will explain about re-design of power plant using ocean wave energy ponton system with three pendulums in order to obtain ocean energy.

This undergraduate thesis will demonstrate re-design to a ponton power plant using a ponton system with 3 pendulums by optimazing pendulums mass and pendulums length shaft in its ponton. The content of this undergraduate thesis is about experimental study to influence of mass and pendulum shaft for its rotation that obtained. Where, Mass and the length of pendulum shaft will influence pendulum movingrotation. Whereas frequency and amplitudo of ocean wave that touch ponton body will cause pitching motion. Analysis for this research will be done by varying pendulum mass and pendulum length shaft.

This undergraduate thesis will obtain constan rotation characteristics of pendulum using prototype Ponton Power Plant using 3 pendulums as a result of pendulum mass and pendulum length shaft that varied. The biggest voltage for 3 pendulum variation ($N=3$) with frequency 13 Hz is 0.83 volt and t he

smallest voltage for 1 pendulum variation with frequency 12 Hz is 0.504 Volt. The biggest rotation for 3 pendulums variation with frequency 13 Hz is 290 rpm and the smallest rotation for 1 pendulum variation with frequency 12 Hz is 180,27 rpm.

Keywords: *Ponton, PLTGL Ponton System with 3 pendulum, Pendulum Mass, Pendulum Length Shaft, Frequency and Amplitude of ocean wave energy, voltage*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'alamin, segala puji hanya bagi Allah *subhanahuwata'ala* dan sholawat serta salam semoga senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad *shallallahu'alaihiwasallam*. Dengan rahmat dari Allah *subhanahuwata'ala*, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Rancang Bangun Dan Studi Eksperimen Respon Dinamis Model Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul”** ini dengan baik.

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Ibunda tercinta Surnia dan Ayahanda tercinta Asharuddin, yang senantiasa memberikan dorongan semangat dan moril bagi penulis untuk terus berusaha menuntut ilmu, semoga Allah selalu memberikan rahmat serta hidayahnya.
2. Bapak Ir. Yunarko Triwinarno, MT. sebagai dosen pembimbing yang selalu memberikan bimbingan, dukungan, dan motivasi, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini
3. Bapak Dr. Eng. Harus Laksana Guntur ST., M. Eng sebagai dosen Co. pembimbing yang tidak pernah lelah dan bosan memberikan bimbingan, dukungan, dan motivasi, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati ST., MT., Bapak Moch. Solichin ST., MT., sebagai dosen pembahas yang telah memberikan banyak saran kepada penulis.
5. Kakakku Taufan A.Z. dan Juanda A.Z. yang tidak henti-hentinya mendoakan dan memotivasi penulis untuk selalu ikhlas dan semangat menjalani study di Surabaya.
6. Adikku (Abd. Majid A.Z, Sukmawati A.Z, Ayu Munawarah A.Z, Khalimatussadiyah A.Z)
7. Pacarku tersayang A. Hardianti Rahman SST. Yang selalu menemani penulis dan selalu sabar untuk selalu memberikan semangat kepada penulis selama menjalani study di Surabaya.

8. Seluruh dosen jurusan Teknik Mesin FTI ITS yang telah mendidik dan mengajarkan ilmu pengetahuan kepada penulis.
9. Seluruh karyawan jurusan Teknik Mesin FTI ITS yang telah membantu kelancaran penyelesaian Tugas Akhir ini.
10. Teman-teman Lintas Jalur Gasal 2012 yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.
11. Teman-teman seperjuangan Tugas Akhir di Laboratorium Sistem Dinamis dan Vibrasi (Budi, Wegig, Miftah, Mas Skriptyan, Mas Wanda, Mas Ardhi, chardian, Eva, Herry, Gilang, dkk) yang sama-sama berjuang menuju wisuda 111.
12. Sahabat-sahabat aku (Dika, baim, Samuel, unggul, Dewa, Zulkarnain, Fauzi, Yerson) yang selalu menghibur dan memberi motifasi kepada penulis.
13. Teman-teman NOBITA FC (Ardi, Rudi, Mas Dian, Moldy, Amril, Fachrul, Rendi) yang selalu memberi dukungan dan doa kepada penulis.
14. Teman-teman seperjuangan di ITS asal Sorowako (Wardah, Baim Irma, Eva, Mifta, Niko, Akbar, Andri, Efraim, Bapak Harjuma, Bapak Yusuf Kadang) yang selalu memberikan bantuan kepada penulis selama di Surabaya.
15. Teman-teman Bengkel “Risman Motor” (Risman, Enal, Dayat, Lula, Raim) yang selalu memberikan semangat dan motifasi kepada penulis selama menjalani study di Surabaya.
16. Semua pihak yang telah membantu penyelesaian Tugas Akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Akhirnya, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan para pembaca pada umumnya, sebagai bentuk sumbangsih penulis untuk kemajuan bangsa Indonesia. Penulis menyadari kekurangan yang ada pada Tugas Akhir ini, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan untuk kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Surabaya, Januari 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABLE	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 latar belakang	1
1.2 perumusan masalah	2
1.3 tujuan penelitian	2
1.4 batasan masalah	2
1.5 manfaat penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.1.1 PLTGL oleh Putu Risti Nirmalasari	8
2.2 Gelombang Air Laut	10
2.3 Ponton	11
2.3.1 Gerakan Ponton	14
2.4 Teori <i>Compound</i> Pendulum	19
2.5 Gearbox	21
2.6 Generator	22
2.7 Analisa Hasil Voltase	24
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir (<i>flowchart</i>) Penyusunan Tugas Akhir	25
3.1.1 Studi Literatur	26
3.1.2 Identifikasi Masalah	26
3.1.3 Re-Desain Mekanisme PLTGL-STB	26
3.1.4 Pengujian Kelayakan	32
3.1.5 Penentuan Variasi Pengujian	32
3.1.5.1 Variasi massa Bandul	32
3.1.5.2 Variasi massa Lengan	33
3.1.6 Pengambilan Data	33

3.1.6.1 Diagram Alir Pengambilan Data.....	33
3.1.6.2 Peralatan Pengambilan Data.....	34
3.1.6.3 Format Lembar Pengambilan Data.....	35
3.1.7 Analisa.....	36
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Prototype simulator PLTGL Sistem Ponton Tiga Bandul....	37
4.2 Analisa Teori	39
4.2.1 Contoh Perhitungan $L = 0,22$ m.....	39
4.2.2 Contoh Perhitungan Massa Bandul	40
4.2.3 Contoh Perhitungan Rpm	40
4.3 Analisa Eksperimen	41
4.3.1 Variasi Jumlah Lengan Pada $F = 12$ Hz	41
4.3.2 Variasi Jumlah Lengan Pada $F = 13$ Hz	43
4.3.3 Variasi Jumlah Lengan Pada $F = 14$ Hz	44
4.4 Analisa Pengaruh Variasi.....	46
4.4.1 Analisa Pengaruh Jumlah Variasi Bandul Yang Terpasang Terhadap tegangan	46
4.4.2 Analisa Pengaruh Jumlah Variasi Frekuensi Terhadap tegangan.....	47
4.5 Analisa Pengaruh Variasi Terhadap Putaran.....	49
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran	55
DAFTAR PUSTAKA.....	xvii
LAMPIRAN	
RIWAYAT PENULIS	

DAFTAR TABEL

Table 2.1 .Data Hasil percobaan PLTGL-SSP Putu Risti Nirmalasari.....	9
Table 3.1 Spesifikasi <i>gearbox</i> dan motor AC.....	30
Tabel 3.2 Perencanaan panjang lengan dan massa Bandul	32
Tabel 3.3 ContohTabel Data Hasil Pengujian	36
Tabel 4.1. Data Eksperimen Variasi Jumlah Bandul Yang Terpasang.....	46
Tabel 4.2 Data Eksperimen Variasi Frekuensi	48
Tabel 4.3 Spesifikasi Kecepatan Putaran generator	49
Tabel 4.4 Data Eksperimen Pengaruh variasi terhadap putaran (<i>n</i>).....	51

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Ilustrasi PLTGL-SB Zamrisyaf SY.....	5
Gambar 2.2	PLTGL SeaGen (<i>Sea Generation</i>).....	6
Gambar 2.3	PLTGL jenis <i>Powerbuoy</i>	7
Gambar 2.4	PLTGL oleh Putu Risti Nirmalasari.....	9
Gambar 2.5	Gelombang Air Laut	10
Gambar 2.6	Benda Mengapung Terkena Gerak Naik Turun Air Laut.....	11
Gambar 2.7	Letak Titik – Titik Penting Pada Ponton	12
Gambar 2.8	Gaya-Gaya Yang Bekerja Pada Ponton	16
Gambar 2.9	<i>Free Body</i> Diagram Bandul.....	16
Gambar 2.10	<i>Compound pendulum</i>	19
Gambar 2.11	<i>Free Body</i> Diagram Dari Massa <i>Compound</i> <i>pendulum</i>	19
Gambar 2.12	<i>Gear Box</i> PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul.....	22
Gambar 2.13	<i>Generator AC</i> dan <i>DC</i>	23
Gambar 3.1	<i>Flowchart</i> penyusunan Tugas Akhir.....	26
Gambar 3.2	Bentuk rancangan ponton.....	27
Gambar 3.3	Ilustrasi dari volume ponton.....	28
Gambar 3.4	Bentuk segi delapan (<i>Octagonal</i>).....	29
Gambar 3.5	Segitiga.....	29
Gambar 3.6	Rangkaian motor dan <i>gearbox</i>	31
Gambar 3.7	Bandul dan Lengan bandul.....	31
Gambar 3.8	<i>flow chart</i> pengambilan data.....	34
Gambar 3.9	Kolam Simulasi Gelombang dan Mekanisme Pembuat Gelombang.....	34
Gambar 3.10	<i>Digital Storage Oscilloscope</i>	35
Gambar 4.1	Simulator PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga ..	37
Gambar 4.2	Data Percobaan pada <i>Oscilloscope</i>	38
Gambar 4.3	Grafik Variasi Jumlah Lengan pada $F=12\text{ Hz}$	42
Gambar 4.4	Grafik Variasi Jumlah Lengan pada $F=13\text{ Hz}$	43
Gambar 4.5	Grafik Variasi Jumlah Lengan pada $F=14\text{ Hz}$	44
Gambar 4.6	Grafik Pengaruh Variasi Jumlah Bandul Yang	

Terpasang Vs Tegangan.....	47
Gambar 4.7 Grafik Pengaruh variasi <i>frequency</i> vs Tegangan .	48
Gambar 4.8 Grafik Spesifikasi Generator	50
Gambar 4.9 Grafik Jumlah bandul Vs Putaran.....	51
Gambar 4.10 Grafik f Vs n	53

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Indonesia salah satu negara yang memiliki potensi wilayah kelautan yang sangat besar. Dan karena geografis indonesia pula menyebabkan adanya sumber daya kelautan yang sangat besar pula dan potensi laut yang stabil. Salah satu potensi tersebut adalah energi gelombang laut. Gelombang laut yang berada di Indonesia ada pada sepanjang tahun berbeda halnya seperti di negara lain contohnya Thailand karena gelombang laut di negara tersebut datang dikarenakan adanya badai terlebih dahulu. Hal tersebut merupakan salah satu alasan mengapa Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut ini semakin dikembangkan di Indonesia. Teknologi pengembangan energi dari laut tersebut dapat memecahkan masalah energi listrik sebagai negara kepulauan, apalagi masih banyak pulau-pulau atau daerah-daerah terpencil yang memerlukan penanganan khusus termasuk penyediaan energi listrik. Teknologi ini dapat memperkuat nilai tawar bangsa Indonesia dalam hal teknologi energi baru dan terbarukan, dan menghadapi isu pemanasan global. Salah satunya dengan pengembangan teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Model 3 Bandul dengan panjang lengan yang divariasikan dan massa yang konstan.

Teknologi PLTGL-SB atau Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Bandul yang ada saat ini adalah salah satu teknologi karya Bapak Zamrisyaf SY dari Badan Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero). Dalam Laporan Pekerjaan Tahap I, Studi Pemodelan dan Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandul (PLTGL – SB) kerjasama antara Badan Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) dan Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Institut Teknologi Sepuluh Nopember tahun 2010, dilakukan riset mengenai bentuk PLTGL – SB yang

disempurnakan dengan menggunakan 3 lengan yang divariasikan dan dengan massa yang konstan. Kemudian ponton ditempatkan mendatar di atas permukaan air laut. Gelombang laut akan membuat miring ponton datar. Kemiringan ponton datar ini mengakibatkan bandul berputar.

Gerak ponton datar yang cenderung acak atau tidak beraturan diakibatkan oleh datangnya gelombang laut yang mengganguya yang tidak beraturan pula. Pergerakan ponton datar yang acak ini mempengaruhi perputaran bandul yang berada di atasnya. Perputaran yang terjadi diharapkan akan selalu searah dan menghasilkan Amplitudo dan Frekuensi yang konstan. Sedang belum ada studi tentang respon perputaran bandul tersebut dari penelitian-penelitian mengenai PLTGL sistem 3 bandul.

1.2. Perumusan Masalah

1. Bagaimana merancang bangun model ponton pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem tiga bandul
2. Bagaimana menguji karakteristik respon dinamis model pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem tiga bandul

1.3. Tujuan Penelitian

1. merancang bangun model ponton pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem tiga bandul
2. menguji karakteristik respon dinamis model pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem tiga bandul

1.4. Batasan Masalah

Untuk analisa di atas maka dibutuhkan beberapa batasan masalah yang akan diambil sebagai berikut :

1. Sistem bandul merupakan sistem dengan *single degree of freedom*.
2. Seluruh massa yang bergerak dianggap kaku, sehingga defleksi yang dialami oleh massa akibat elastisitas diabaikan karena sangat kecil.
3. Disk bandul dianggap partikel bermassa.
4. Pengaruh gesekan torsional pada bandul diabaikan.

5. Gerakan yang membuat ponton miring terjadi akibat gelombang laut yang diasumsikan sinusoidal.
6. Profil gelombang laut hanya terjadi pada arah sumbu X saja dan Y saja, serta yang merupakan sumbu tetap. dengan bidang X-Y merupakan bidang permukaan air laut dengan frekuensi gelombang laut pada kedua arah sama.
7. Gerakan gelombang laut disimulasikan dalam sebuah mekanisme.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian adalah :

1. Bagi teknologi energi baru dan terbarukan penelitian ini dapat menyempurnakan penelitian-penelitian lain mengenai Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Bandul.
2. Sebagai masukan perhitungan teoritis bagi studi eksperimental dan rancang bangun pada penelitian mengenai Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem 3 Bandul.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Pemanfaatan gelombang laut sebagai sumber energi terbarukan telah dilakukan oleh beberapa negara seperti Amerika, Perancis, Rusia, Cina, Kanada, Korea, Malaysia, Jepang dan Indonesia. Terbukti dengan adanya hasil riset dan peralatan berteknologi yang tercipta untuk pengembangan energi laut.



Gambar 2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut-Sistem Bandulan (PLTGL-SB).

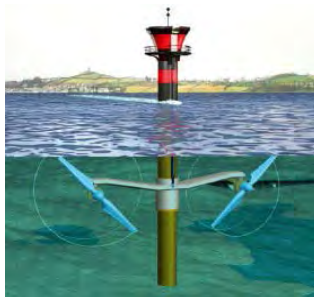
(Sumber: Asosiasi Energi Laut Indonesia-ASELI)

Pada gambar 2.1 adalah PLTGL-SB yang merupakan temuan dari Bapak Zamrisyaf dengan melakukan kerjasama bersama Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Pada tahap awal, potensi maksimal dari satu unit PLTGL sekitar 125 kw hingga 300kw. Berdasarkan pada perhitungan, berat bandul 10 kg; panjang lengan bandul 2 meter; periode gelombang laut rata-rata 3 detik mencapai ketinggian 1,5 meter; Daya yang dihasilkan satu set bandul sekitar 25,2kw.¹ Pembangkit ini pernah diuji coba

¹Balitbang Ketenagalistrikan PLN dan LPPM ITS, 2010.Studi Pemodelan dan Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut-Sistem Bandulan (PLTGL-SB).

tahun 2007 di Pantai Ulak Karang Padang dan diperkirakan mampu menghasilkan listrik sebesar 300 watt meskipun belum bisa dikatakan berhasil. Cara kerja alat ini dengan menggunakan ponton yang berfungsi sebagai kapal pengangkut bandul yang terintegrasi dengan generator. Untuk menghasilkan putaran generator maksimal, bandul dibantu dengan alat transmisi *double-freewheel* dan dintegrasikan dengan bantuan rantai. Setiap gerakan air laut akan menggoyangkan bandul sehingga menggerakkan *double-freewheel* untuk memutar generator menghasilkan listrik. Zamrisyaf mengubah energi gelombang laut menjadi energi listrik melalui perantara energi gerak bandulan yang menjadi penggerak roda gila. Pada akhirnya, roda gila menggerakkan turbin atau generator yang berputar dan menghasilkan listrik.

Pada PLTGL – SB ini, penggunaan sistem gerak bandulan vertikal masih belum mendapatkan energi listrik yang optimal. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengembangan untuk mendapatkan energi listrik yang optimal dengan eksperimen menggunakan sistem gerak bandul horizontal. Hal ini dikarenakan, bandul yang bergerak vertikal hanya dapat bergerak pada sudut yang kecil sedangkan gerakan horizontal dapat berputar hingga sudut 360 derajat. Melalui sudut perputaran yang dilalui dapat meningkatkan torsi dan energi bangkitan hingga diperkirakan mampu untuk menghasilkan energy listrik yang lebih optimal [1].



Gambar 2.2. *Marine Current Turbines Ltd* di Inggris (UK).
(Sumber: <http://www.seageneration.co.uk>)

Pada gambar 2.2 adalah SeaGen (*Sea Generation*) yang merupakan turbin air yang dibuat oleh *Marine Current Turbines Ltd.*, sebuah perusahaan yang berbasis di Bristol, Inggris. Lokasi yang dipilih adalah selat antara Strangford dan Portaferry, Irlandia Utara, sekitar 400 meter dari garis pantai. SeaGen memiliki dua buah rotor berdiameter 16 meter. Awal proyek pembangkit ini dimulai 2005 dengan kapasitas 1.2 MW, cukup untuk memberikan tenaga listrik bagi sekitar seribu rumah, dan bekerja 18 – 20 jam sehari. Dalam 12 hari, pembangkit ini ditargetkan telah tersambung dengan jaringan listrik lokal. *ESB Independent Energy* telah bersedia membeli listrik dari SeaGen. Yang paling penting, setiap watt listrik yang dihasilkan dari pembangkit ini tidak menghasilkan sedikit pun gas rumah kaca. Proyek yang menghabiskan dana 5.2 juta Pounds (sekitar Rp. 95 Miliar)⁹ ini merupakan salah satu bentuk tindakan nyata yang dilakukan pemerintah Inggris selaku penandatanganan Protokol Kyoto untuk mengatasi pemanasan global.

Pembangkit listrik dengan sistem turbin ini mampu menghasilkan energi listrik yang besar, hal ini dikarenakan pemanfaatan arus pasang surut air laut. Alat ini, bekerja di dalam permukaan air dan telah dilakukan pengembangan terkait di Indonesia mengenai alat serupa. Namun penelitian pada laporan ini mengembang energi laut sektor gelombang bukan arus[2].



Gambar 2.3. PB150 *PowerBuoy* dengan *peak-rated power*.

(Sumber: <http://en.wikipedia.org/wiki/PowerBuoy>)

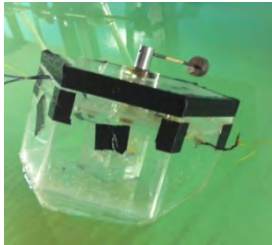
Pada gambar 2.3 menunjukkan PowerBuoy yang merupakan pembangkit listrik untuk menghasilkan energi listrik dari tenaga gelombang laut yang sedang dalam perencanaan di 9 lokasi di seluruh dunia, terutama di Australia dan Amerika Serikat. Listrik dihasilkan dengan menggunakan turbin tenaga air. PowerBuoy dapat dihubungkan ke jaringan listrik dengan kabel transmisi listrik atau dapat beroperasi secara mandiri di lingkungan air bagian dalam. PowerBuoy diproduksi oleh *Ocean Power Technologies* (OPT) di Pennington, New Jersey-USA. Mekanisme kerja alat ini adalah dengan memanfaatkan naik dan turunnya gelombang lepas pantai menyebabkan pelampung untuk bergerak bebas naik dan turun dan menghasilkan energi mekanik yang digunakan untuk menggerakkan generator listrik. Kekuatan gelombang yang dihasilkan ditransmisikan ke darat melalui kabel listrik bawah laut. Pembangkit listrik OPT telah dirancang untuk kondisi gelombang ekstrim. Sensor pada PowerBuoy terus menerus memantau kinerja berbagai subsistem dan lingkungan laut sekitarnya. Data ditransmisikan ke pantai dan ketika laju gelombang sangat besar, sistem akan secara otomatis terkunci dan berhenti memproduksi listrik. Ketika ketinggian gelombang kembali normal, sistem membuka dan memulai lagi konversi energi dan transmisi daya listrik ke daratan.

Pembangkit listrik dengan sistem turbin ini mampu menghasilkan energi listrik yang besar, hal ini dikarenakan pemanfaatan arus pasang surut air laut. Alat ini, bekerja di dalam permukaan air dan telah dilakukan pengembangan terkait di Indonesia mengenai alat serupa. Namun penelitian pada laporan ini mengembangkan energi laut sektor gelombang bukan arus [3].

2.1.1 PLTGL oleh Putu Risti Nirmalasari

Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut ini menggunakan ponton dengan sistem single bandul, dimana energi potensial yang dihasilkan oleh gelombang laut memutar bandul untuk memutar generator. Di bawah ini adalah gambar

dari mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Single Bandul [4].



Gambar 2.4 PLTGL oleh Putu Risti Nirmalasari

Untuk prinsip kerja dari PLTGL-SSP tersebut adalah energi dari gelombang laut dengan menggunakan putaran bandul menghasilkan energi mekanik untuk memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik. Sebelum masuk ke generator, batang bandul dihubungkan terlebih dahulu pada *gearbox* untuk meningkatkan putaran.

Percobaan PLTGL-SSP ini dilakukan dalam skala Lab pada kolam buatan. Tabel dibawah ini adalah hasil percobaan PLTGL-SSP dengan variasi panjang lengan dan massa pendulum dan V adalah voltase yang dihasilkan.

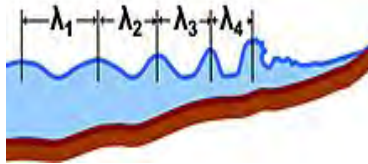
Tabel 2.1 Data Hasil percobaan PLTGL-SSP Putu Risti Nirmalasari

Panjang Lengan (cm)	Massa Bandul (gram)	Vrms (Volt)
6	50	0.0677
	80	0.0764
	100	0.0824
8	50	0.0683
	80	0.0713
	100	0.0806
10	50	0.0696
	80	0.0710
	100	0.0752

Dari data tabel, dapat dilihat bahwa rata-rata tegangan yang dihasilkan dengan amplitudo tetap sebesar 5.35 cm dan frekuensi tetap sebesar 1.487 Hz, hasil perhitungan adalah 0.07 Volt dengan panjang lengan 6 cm dan massa bandul 50, 80, 100 gram.

2.2. Gelombang Air Laut

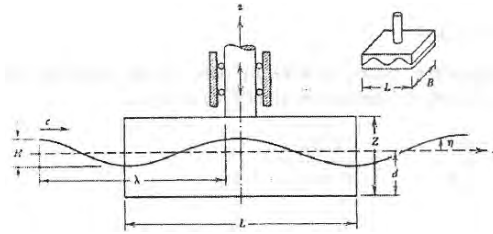
Gelombang laut adalah pergerakan naik dan turunnya air dengan arah tegak lurus pada permukaan air laut yang membentuk kurva ataupun grafik sinusoidal. Bentuk gelombang sinusoidal memiliki karakteristik panjang gelombang yang lebih besar dari tinggi gelombangnya saat di laut sedangkan ketika mendekati daerah pantai maka panjang gelombang menjadi lebih kecil dari tinggi gelombangnya seperti pada Gambar 2.4 [5].



Gambar 2.5. Gelombang Air Laut. (Sumber: <http://id.wikipedia.org/wiki/Gelombang>)

Gelombang pada air laut terjadi akibat beberapa fenomena seperti benda yang bergerak pada atau dekat permukaan sehingga terjadi gelombang dengan perioda kecil, angin yang merupakan sumber penyebab utama gelombang lautan, gangguan seismik yang menyebabkan terjadinya gelombang pasang atau tsunami, medan gravitasi bumi dan bulan menyebabkan gelombang pasang yang tinggi.

Berdasarkan definisi gelombang air laut, ketika diletakkan suatu benda dengan mekanisme tertentu akan dihasilkan energi mekanik dan energi kinetik yang menimbulkan energi listrik. Adapun ilustrasi benda tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.5 [6].



Gambar 2.6. Benda mengapung terkena gerak naik turun air laut.
(Sumber: Astu Pudjanarsa, Djati Nursuhud. 2007)

Pada gambar 2.6. ditunjukkan suatu benda yang memanfaatkan gerak naik turunnya air laut pada arah vertikal. Gerak naik turun benda mendorong suatu mekanisme alat yang dapat mengubah energi gelombang laut menjadi energi listrik ataupun penggerak mekanisme lain. Besarnya frekuensi gerak naik turun dari benda terapung dijabarkan oleh McCormick (1973) sebagai berikut.

$$f_z = \frac{1}{T_z} = \frac{\omega_z}{2\pi} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho g A_{wp}}{m + m_w}}$$

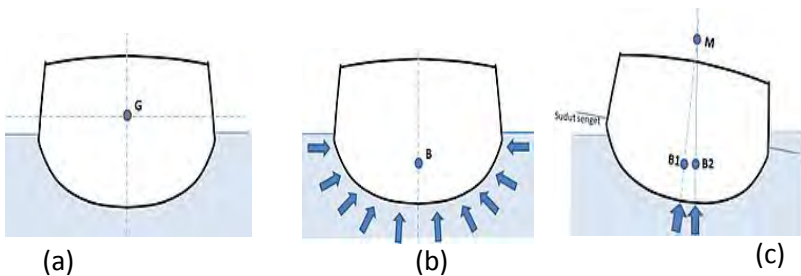
Dimana,

- T_z : periode gerak naik turun
- ω : frekuensi sirkular ($2\pi f$)
- ρ : massa jenis air laut
- m : massa sistem yang bergerak naik turun
- m_w : masa air yang merangsang gerak naik turun
- A_{wp} : luas muka benda yang mengapung

2.3. Ponton

Berdasarkan pada sub bab sebelumnya yang menjelaskan mengenai benda dengan mekanisme tertentu yang dapat menghasilkan listrik pada penelitian ini disebut dengan ponton. Ponton adalah benda yang memiliki lambung datar dan dapat mengapung ketika diletakkan pada permukaan air. Pada tahun

1960 – 1980, ponton sering sekali digunakan di beberapa jalur lintas Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, dan Papua. Kapal ini sangat stabil dan dapat dijalankan dengan mudah. Desain lambung kapal yang dimiliki mempengaruhi kecepatan, dimana semakin *streamline* maka laju kapal akan semakin cepat. Stabilitas ponton dipengaruhi oleh beberapa titik penting, seperti titik berat (*centre of gravity*), titik apung (*centre of buoyancy*), dan *metacenter*.² [7]



Gambar 2.7. Letak titik – titik penting sebagai stabilitas ponton di perairan. (a) titik berat, (b) titik apung, (c) titik metasentris. (Sumber: http://id.wikibooks.org/wiki/Pelayaran_Sungai_dan_Danau/Dasar-dasar_Kapal)

Titik berat (*centre of gravity*) dikenal dengan titik G, merupakan titik tangkap dari semua gaya-gaya yang menekan ke bawah terhadap ponton ($F_{\text{gravitasi}}$). Letak titik G dapat diketahui dengan meninjau semua pembagian bobot di ponton, makin banyak bobot yang diletakkan di bagian atas maka makin tinggilah letak titik G-nya. Secara definisi, titik berat (G) ialah titik tangkap dari semua gaya – gaya yang bekerja ke bawah. Letak titik G pada ponton yang kosong ditentukan oleh hasil percobaan stabilitas. Perlu diketahui bahwa, letak titik G tergantung daripada pembagian berat di dalam ponton. Jadi, selama tidak ada berat yang di geser baik ditambah ataupun

²Pelayaran Sungai dan Danau / Dasar – Dasar Kapal

dikurangi, titik G tidak akan berubah walaupun ponton oleng atau mengangguk (*trim*).

Titik apung (*center of buoyance*) dikenal dengan titik B, merupakan titik tangkap dari resultan gaya-gaya yang menekan tegak ke atas ($F_{buoyancy}$) dari bagian ponton yang terbenam dalam air. Titik tangkap B bukanlah suatu titik yang tetap tetapi berpindah - pindah oleh adanya perubahan sarat dari ponton. Dalam stabilitas ponton, titik B inilah yang menyebabkan kapal mampu untuk tegak kembali. Letak titik B tergantung dari besarnya kemiringan kapal (bila kemiringan berubah maka letak titik B akan berubah). Bila kapal miring maka titik B akan berpindah kesisi yang rendah.

Titik metasentris atau dikenal dengan titik M, merupakan sebuah titik semu dari batas di mana titik G tidak boleh melewati di atasnya agar supaya ponton tetap mempunyai stabilitas yang positif (stabil). Meta artinya berubah-ubah, jadi titik metasentris dapat berubah letaknya dan tergantung dari besarnya sudut kemiringan. Apabila kapal miring pada sudut kecil (tidak lebih dari 15^0), maka titik apung B bergerak di sepanjang busur di mana titik M merupakan titik pusatnya di bidang tengah ponton dan pada sudut kemiringan yang kecil ini perpindahan letak titik M sangat kecil, sehingga dapat dikatakan tetap.

Titik – titik penting ponton selain menentukan stabilitas ponton dapat pula digunakan untuk menganalisa gaya yang terjadi pada gelombang laut. Seperti pada rumusan berikut ini.

$$F_{generated} = \sum F = (F_{wave} + F_{bouyancy}) - F_{gravitasi}$$

Dimana,

$F_{generated}$ = resultan gaya yang dihasilkan untuk menggerakkan benda bergerak keatas

$F_{buoyancy}$ = gaya apung pelampung

$F_{gravitasi}$ = gaya berat yang diterima sistem penangkap gelombang

Gaya yang dihasilkan gelombang sebagai berikut.

$$F_{\text{wave}} (\rho_{\text{fluida}} \cdot g \cdot \text{Volume}_{\text{benda tercelup}})$$

Gaya yang ditransferkan oleh gelombang adalah sebagai berikut.

$$F_{\text{generated}} \left(\frac{P_{\text{wave}}}{c} \right)$$

$c_g = c$ (untuk perairan dangkal)

$$P_{\text{wave}} = \frac{\rho g H^2 b c_g}{8}$$

Dimana,

P_{wave} = wave power; energy flux

c_g = group velocity

c = group velocity untuk perairan dangkal

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

g = percepatan gravitasi (9.8 m/s^2)

H = tinggi gelombang (meter)

b = lebar puncak gelombang (meter)

2.3.1. Gerakan Ponton

Pada gerak lurus atau gerak translasi, faktor yang menyebabkan adanya gerak adalah gaya (F). Sedangkan pada gerak rotasi atau melingkar, penyebab berputarnya benda dinamakan momen gaya (Torsi) yang merupakan hubungan antara faktor gaya (F) dan faktor lengan gaya (L) yang tegak lurus dengan arah gaya. Secara matematis, momen gaya dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\tau = F \cdot L$$

Jika antara lengan gaya L dan gaya F tidak tegak lurus maka rumusan sebagai berikut.

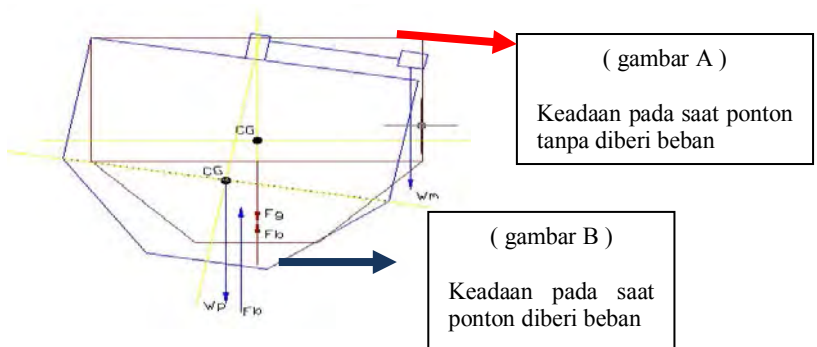
$$\tau = F \cdot L \cdot \sin\theta$$

Dimana, θ adalah sudut antara lengan gaya L dengan gaya F . Lengan gaya merupakan jarak antara titik tumpuan atau poros ke titik dimana gaya itu bekerja. Jika gaya diberikan berada di ujung lengan maka bisa dikatakan lengan gaya sama dengan jari-jari lingkaran (r). Sehingga momen gaya dapat juga ditulis sebagai berikut.

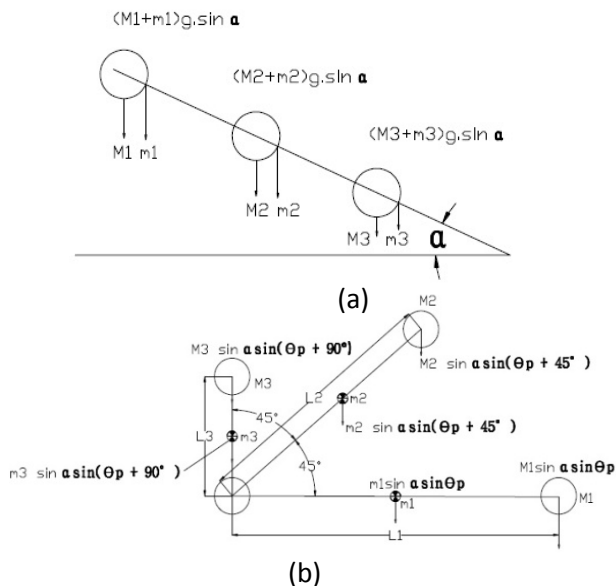
$$\tau = F \cdot r$$

Dalam pokok bahasan hukum II newton, bahwa sebuah benda bisa bergerak lurus dengan percepatan tertentu jika diberikan gaya. Misalnya terdapat sebuah buku yang terletak di atas meja. Mula-mula buku itu diam (kecepatan = 0). Setelah diberikan gaya dorong, buku itu bergerak dengan kecepatan tertentu. Buku mengalami perubahan kecepatan (dari diam menjadi bergerak) akibat adanya gaya. Perubahan kecepatan = percepatan. Dapat dikatakan bahwa buku mengalami percepatan akibat adanya gaya. Semakin besar gaya yang diberikan, semakin besar percepatan gerak buku itu. Jadi pada gerak lurus, gaya sebanding dengan percepatan linear benda. Sedangkan pada gerak berputar percepatan sudut benda berbanding lurus dengan torsi. Semakin besar torsi, semakin besar percepatan sudut. Semakin kecil torsi, semakin kecil percepatan sudut (percepatan sudut = perubahan kecepatan sudut).

Adapun persamaan statis ponton dengan dan tanpa bandul adalah sebagai berikut.



Gambar 2.8 gaya-gaya yang bekerja pada ponton (a) pada saat ponton tanpa beban, (b) pada saat ponton diberi beban bandul.



Gambar 2.9. Free Body Diagram Bandul, (a) pandangan samping, (b) pandangan Atas

(Sumber: Ario Pratama, Tugas Akhir, 2012)

Adapun rumusan untuk momen inersia silinder pejal dari bandul adalah sebagai berikut.

$$J_{p1} = M_1 l_1^2 + \frac{m_1 \cdot l_1^2}{3} \quad (2.9)$$

$$J_{p2} = M_2 l_2^2 + \frac{m_2 \cdot l_2^2}{3} \quad (2.10)$$

$$J_{p3} = M_3 l_3^2 + \frac{m_3 \cdot l_3^2}{3} \quad (2.11)$$

Perhitungan mengenai persamaan gerak pendulum berlaku persamaan gerak rotasi mengelilingi sumbu tetap sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \Sigma M = \Sigma J_P \ddot{\theta}_p \\ (M_1 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin \theta_p \cdot L_1 + m_1 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin \theta_p \cdot \frac{L_1}{2}) + \\ (M_2 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot L_2 + m_2 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin(\theta_p + \\ 45^\circ) \cdot \frac{L_2}{2}) + (M_3 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin(\theta_p + 90^\circ) \cdot L_3 + \\ m_3 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin(\theta_p + 90^\circ) \cdot \frac{L_3}{2}) = \Sigma J_P \ddot{\theta}_p \end{aligned}$$

Karena,

$$M_1 \neq M_2 \neq M_3$$

$$m_1 \neq m_2 \neq m_3, \text{ maka :}$$

$$\begin{aligned} (M_1 \cdot \sin \theta_p \cdot L_1 + M_2 \cdot \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot L_2 + M_3 \cdot \sin(\theta_p + \\ 90^\circ) \cdot L_3) g \cdot \sin \alpha + \left(m_1 \cdot \sin \theta_p \cdot \frac{L_1}{2} + m_2 \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot \frac{L_2}{2} + \right. \\ \left. m_3 \sin(\theta_p + 90^\circ) \cdot \frac{L_3}{2} \right) g \cdot \sin \alpha = \Sigma J_P \ddot{\theta}_p \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} (M_1 \cdot \sin \theta_p \cdot L_1 + M_2 \cdot \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot L_2) + M_3 \cdot \sin(\theta_p + \\ 90^\circ) \cdot L_3) g \cdot \sin \alpha + g \cdot \sin \alpha \left(m_1 \cdot \sin \theta_p \cdot \frac{L_1}{2} + m_2 \cdot \sin(\theta_p + \right. \end{aligned}$$

$$45^\circ) \cdot \frac{L_2}{2} + m_3 \sin (\theta_p + 90^\circ) \cdot \frac{L_3}{2} \Big) = \Big(M_1 l_1^2 + \frac{m_1 l_1^2}{3} \Big) \ddot{\theta} + \Big(M_2 l_2^2 + \frac{m_2 l_2^2}{3} \Big) \ddot{\theta} + \Big(M_3 l_3^2 + \frac{m_3 l_3^2}{3} \Big) \ddot{\theta} \quad (2.14)$$

$$\Big((M_1 + \frac{1}{2} m_1) L_1 \cdot \sin \theta_p + (M_2 + \frac{1}{2} m_2) L_2 \cdot \sin (\theta_p + 45^\circ) + (M_3 + \frac{1}{2} m_3) L_3 \cdot \sin (\theta_p + 90^\circ) \Big) g \cdot \sin \alpha = \Big(M_1 l_1^2 + M_2 l_2^2 + M_3 l_3^2 + \frac{1}{3} (m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2) \Big) \ddot{\theta} \quad (2.15)$$

$$\Big(M_1 l_1^2 + M_2 l_2^2 + M_3 l_3^2 + \frac{1}{3} (m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2) \Big) \ddot{\theta} - \Big((M_1 + \frac{1}{2} m_1) L_1 \cdot \sin \theta_p + (M_2 + \frac{1}{2} m_2) L_2 \cdot \sin (\theta_p + 45^\circ) + (M_3 + \frac{1}{2} m_3) L_3 \cdot \sin (\theta_p + 90^\circ) \Big) g \cdot \sin \alpha = 0 \quad (2.16)$$

Karena,

$$\sin (\theta_p + 45^\circ) = \sin \theta_p \cos 45^\circ + \cos \theta_p \sin 45^\circ$$

$$= \frac{1}{2} \sqrt{2} \sin \theta_p + \frac{1}{2} \sqrt{2} \cos \theta_p$$

$$= \frac{1}{2} \sqrt{2} (\sin \theta_p + \cos \theta_p)$$

$$\sin (\theta_p + 90^\circ) = \sin \theta_p \cos 90^\circ + \cos \theta_p \sin 90^\circ$$

$$= 0 + \cos \theta_p$$

$$= \cos \theta_p \text{ maka ,}$$

$$\Big(M_1 l_1^2 + M_2 l_2^2 + M_3 l_3^2 + \frac{1}{3} (m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2) \Big) \ddot{\theta} - \Big((M_1 + \frac{1}{2} m_1) L_1 \cdot \sin \theta_p + (M_2 + \frac{1}{2} m_2) L_2 \cdot \frac{1}{2} \sqrt{2} (\sin \theta_p + \cos \theta_p) + (M_3 + \frac{1}{2} m_3) L_3 \cos \theta_p \Big) g \cdot \sin \alpha = 0 \quad (2.17)$$

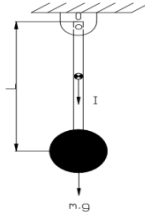
$\omega n =$

$$\sqrt{\frac{((M_1 + \frac{1}{2}m_1)L_1 \sin \theta_p + (M_2 + \frac{1}{2}m_2)L_2 \cdot \frac{1}{2}\sqrt{2}(\sin \theta_p + \cos \theta_p) + (M_3 + \frac{1}{2}m_3)L_3 \cos \theta_p)g}{(M_1 l_1^2 + M_2 l_2^2 + M_3 l_3^2 + \frac{1}{3}(m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2)}}$$

(2.18)

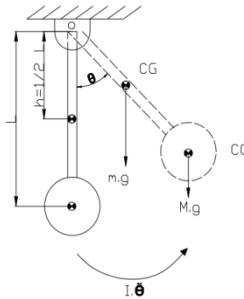
2.4. Teori Compound Pendulum

Setiap benda yang dipasang secara horizontal akan mengalami osilasi akibat dari gaya gravitasi yang disebut *compound pendulum*. *Compound pendulum* yaitu bandul berbentuk batang (rod) yang memiliki massa m dan panjang L .



Gambar 2.10 Compound pendulum

Free Body Diagram



Gambar 2.11 Free Body Diagram

Persamaan gerak *compound pendulum*

$$\Sigma Mo = I\ddot{\theta} \quad (2.19)$$

$$-Mgl \sin \theta - mg \frac{l}{2} \sin \theta = (I_m + I_M) \ddot{\theta} \quad (2.20)$$

Dimana inertia untuk batang (*rod*) dan bandul yaitu

$$I_m = \frac{1}{3} ml^2 \quad (2.21)$$

$$I_M = ml^2 \quad (2.22)$$

Substitusi Persamaan 2.21 dan 2.22 ke persamaan 2.20

$$\left(\frac{1}{3} ml^2 + Ml^2 \right) \cdot \ddot{\theta} + \left(m \cdot g \cdot l \frac{l}{2} + M \cdot g \cdot l \right) \theta = 0 \quad (2.23)$$

$$\ddot{\theta} + \frac{M + \frac{m}{2}}{M + \frac{m}{3}} \left(\frac{g}{L} \right) \theta = 0 \quad (2.24)$$

Sehingga didapatkan persamaan frekuensi natural *compound pendulum*

$$\omega_n = \sqrt{\frac{M + \frac{m}{2}}{M + \frac{m}{3}}} \left(\frac{g}{L} \right) \quad (2.25)$$

Dimana : ω_n = Frequency natural (rad/s)

M = berat Bandul (kg)

m = berat lengan bandul (kg)

g = gaya gravitasi (9.8 m/s²)

L = Panjang lengan bandul (meter)

2.5 *Gearbox*

Sebuah mesin terdiri dari sumber daya dan sistem transmisi daya yang menyediakan aplikasi pengontrol daya. Merriam-Webster mendefinisikan transmisi sebagai perakitan bagian-bagian seperti roda gigi perubah kecepatan dan poros, dimana daya ditransmisikan dari mesin ke as roda yang ingin digerakkan. Seringkali transmisi mengacu pada gearbox yang menggunakan roda gigi dan gear train (sistem transmisi berupa roda gigi yang saling berhubungan) untuk menaikkan kecepatan dan torsi konversi dari sumber listrik berputar ke perangkat lain.

Gearbox adalah salah satu komponen utama motor yang disebut sebagai sistem pemindah tenaga yang mempunyai beberapa fungsi antara lain:

1. Merubah momen puntir yang akan diteruskan ke spindel mesin.
2. Menyediakan rasio gigi yang sesuai dengan beban mesin.
3. Menghasilkan putaran mesin tanpa selip.

Adapun prinsip kerja *gearbox* yaitu dengan menggunakan Putaran dari motor diteruskan ke input shaft (poros input) melalui hubungan antara kopling, kemudian putaran diteruskan ke main shaft (poros utama), torsi atau momen yang ada di mainshaft diteruskan ke spindel mesin, karena adanya perbedaan rasio dan bentuk dari gigi-gigi tersebut sehingga rpm atau putaran spindel yang di keluarkan berbeda, tergantung dari rpm yang diinginkan. Berikut penjelasan beberapa part yang terdapat dalam gearbox.

1. *Input shaft* (poros input)

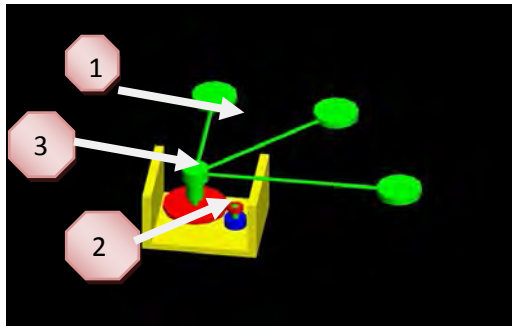
Input shaft adalah komponen yang menerima momen output dari unit kopling, poros input juga berfungsi untuk meneruskan putaran dari kopling ke *mainshaft* (poros utama), sehingga putaran bisa di teruskan ke *gear-gear*. Input shaft juga sebagai poros dukungan *bearing* (bantalan) dan *piston ring* (cincin piston), selain itu berfungsi juga sebagai saluran oli untuk melumasi bagian dari pada *inputshaft* tersebut.

2. *Main shaft* (poros utama)

Mainshaft yang berfungsi sebagai tempat duduk gear, sinchromest, bearing dan komponen-komponen lainnya. *Main shaft* juga berfungsi sebagai poros penerus putaran dari *input shaft* sehingga putaran dapat di teruskan ke spindel, *main shaft* juga berfungsi sebagai saluran tempat jalannya oli.

3. *Transmission gear* atau roda gigi transmisi

Transmission gear atau roda gigi transmisi berfungsi untuk mengubah input dari motor menjadi output gaya torsi yang meninggalkan transmisi sesuai dengan kebutuhan mesin.



Gambar 2.12 Gear Box **PLTGL** Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul

Keterangan gambar :

1. *Input shaft* (poros input)
2. *Main shaft* (poros utama)
3. *Transmission gear* atau roda gigi transmisi

2.6 Generator

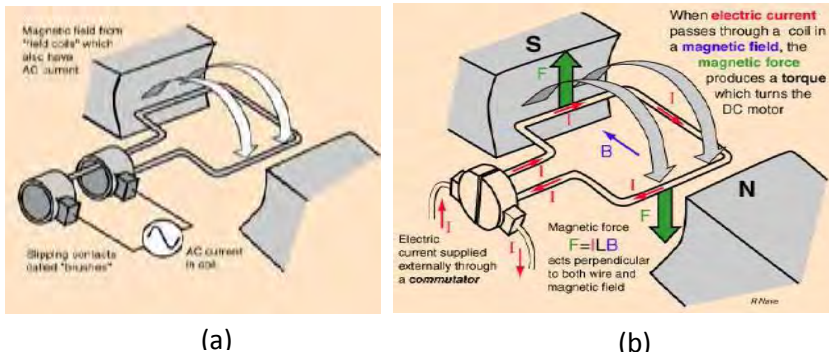
Penerapan dari konsep induksi elektromagnetik digunakan pada dinamo atau generator. Alat ini mengubah energi mekanik atau kinetik menjadi energi listrik. Prinsip kerja dinamo atau generator ada dua macam, antara lain:

1. Kumparan berputar di dalam suatu medan magnet.

2. Magnet berputar di antara beberapa kumparan.

Saat kumparan diputar diantara kutub-kutub magnet sehingga memotong garis-garis medan magnet maka kumparan akan menerima fluks magnet yang besarnya berubah-ubah. Perubahan fluks magnet ini dapat menimbulkan ggl induksi. Energi kinetik pada dinamo atau generator dapat diperoleh dari putaran roda, angin, dan air terjun. Pada umumnya berdasarkan arus yang dihasilkan, dinamo atau generator dibedakan menjadi dua macam, yaitu AC (arus bolak-balik) dan DC (arus searah). Pada sebuah dinamo terdapat bagian yang berputar disebut *rotor*, sedangkan bagian yang diam disebut *stator*. Gaya gerak listrik induksi pada dinamo ataupun generator dan juga kuat arus induksinya dapat diperbesar dengan cara sebagai berikut [8]:

1. Mempercepat putaran rotor.
2. Memperbesar jumlah lilitan kumparan.
3. Menggunakan magnet yang kuat.
4. Memasukan inti besi lunak ke dalam kumparan



Gambar 2.13. Kumparan Berputar Didalam Suatu Medan Magnet Pada Generator (a)AC (b) DC.

(Sumber: Jurnal studi eksperimental dan menganalisa pengaruh variasi massa bandul terhadap pola gerak bandul dan voltase bangkitan generator pada Simulator Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut - Sistem Bandul Konis ponton datar, Luluk, 2011)

Prinsip kerja dinamo atau generator DC sama dengan generator AC. Namun, generator DC arah arus induksinya tidak berubah. Hal ini disebabkan cincin generator DC berupa cincin belah (komutator). Besarnya GGL (Gaya Gerak Listrik) induksi dalam kumparan atau voltase yang dibangkitkan oleh generator adalah sebagai berikut [9].

$$E_{max} = N . B . A . \omega$$

Dimana,

N = Jumlah lilitan (buah)

B = Kuat medan magnet (T)

A = Luas kumparan (m^2)

ω = Kecepatan sudut (rad/sec)

2.7 Analisa Hasil Voltase

Hasil yang didapat dengan menyambungkan kabel generator pada mekanisme ponton dengan alat oskiloskop berupa data acak yang menggambarkan voltase energi listrik yang dihasilkan. Data tersebut dapat dianalisa dengan menggunakan metode *Root Mean Square* (RMS) melalui software Matlab dan Microsoft Excel.

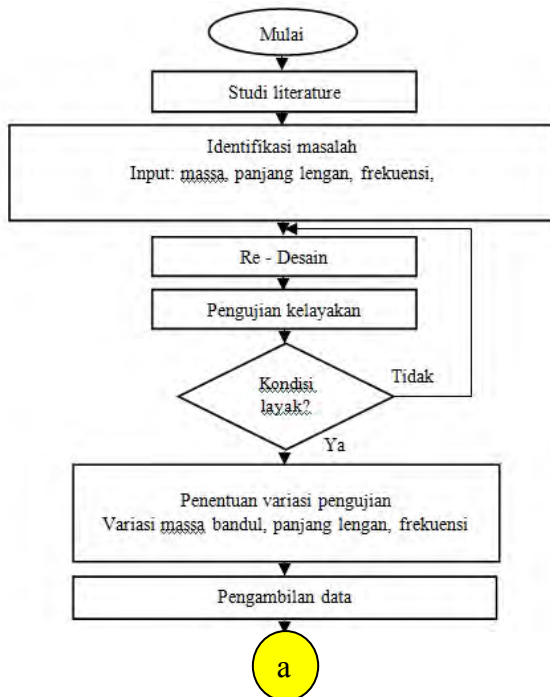
BAB III

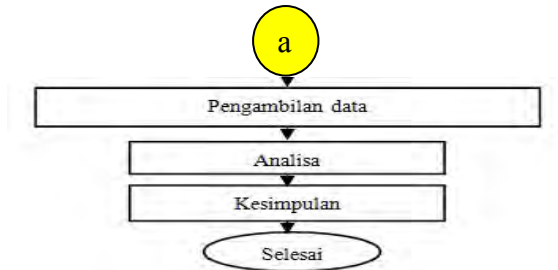
METODE PENELITIAN

Tujuan Tugas Akhir dengan menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) – dengan *sistem tiga bandul* (STB) ini adalah untuk melakukan studi eksperimental dan mengetahui besar energi listrik beserta karakteristiknya terhadap variasi massa bandul, panjang lengan, frekuensi dan amplitudo gelombang laut. Untuk memenuhi tujuan tersebut dilakukan beberapa tahapan pengujian sebagai berikut.

3.1. Diagram Alir (*Flowchart*) Penyusunan Tugas Akhir

Langkah-langkah secara umum penyusunan Tugas Akhir seperti pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1. Flowchart penyusunan Tugas Akhir

3.1.1. Studi Literatur

Sebelum dilakukan penelitian, dilakukan studi terlebih dahulu mengenai beberapa literatur dan referensi yang berkaitan dengan pola pergerakan bandul. Literatur yang dipelajari berupa tugas akhir, jurnal, diktat perkuliahan dan *textbook*.

3.1.2. Identifikasi Masalah

Pada Tugas Akhir ini, masalah diidentifikasi menjadi dua yaitu berupa input dan output. Dimana input yang diberikan berupa variasi massa bandul, panjang lengan, frekuensi dan amplitudo gelombang. Dengan *output* berupa energi listrik yang dilihat dari besarnya voltase keluaran.

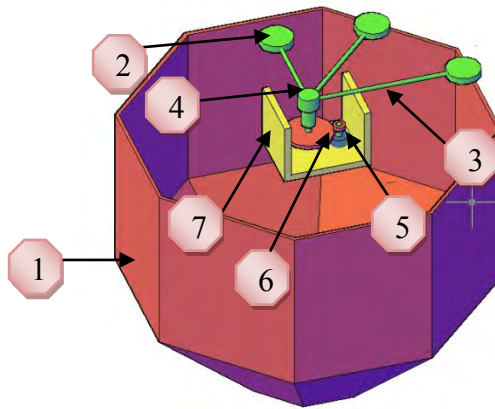
3.1.3. Re – Desain Mekanisme PLTGL – STB

Pada Tugas Akhir ini, melalui desain ponton yang sudah ada dilakukan perancangan kembali dengan mengoptimalkan massa bandul dan panjang lengan bandul terhadap poros utama ponton sehingga menghasilkan putaran yang konsta.

Ponton yang sudah ada terdiri dari *single* bandul dengan *gearbox* dan generator pada bagian lambung ponton. Prinsip kerja alat ini adalah dengan menggunakan putaran bandul menghasilkan energi mekanik untuk memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik. Sebelum masuk ke generator, batang bandul dihubungkan terlebih dahulu pada *gearbox* untuk meningkatkan putaran. Mekanisme *gearbox* menggunakan *idler*

gear untuk menyearahkan putaran bolak-balik bandul akibat gelombang air laut.

Re – desain dilakukan untuk menentukan massa dan panjang lengan bandul yang tepat untuk divariasikan. Terdapat tiga variasi berbeda yang akan diuji pada simulator gelombang air. Bentuk rancangan ponton, variasi massa serta panjang lengan bandul dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Bentuk rancangan ponton yang sudah ada

Keterangan gambar :

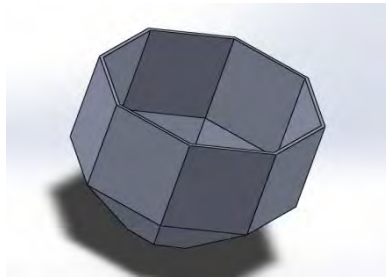
1. Ponton
2. Bandul
3. Lengan bandul
4. Poros
5. Motor AC
6. Gear transmition
7. Gear box

Setelah ditentukan dimensi dan spesifikasi dari alat dan bahan yang akan digunakan dalam pengujian Ponton PLTGL-STB, maka dilakukan pencarian alat dan bahan tersebut di pasaran. Beberapa alat yang membutuhkan pengerjaan khusus dilakukan pemesanan di bengkel. Setelah alat dan bahan tersebut

tersedia, maka dapat dilakukan perakitan Ponton PLTGL - STB seperti pada Gambar 3.2 di atas. Adapun spesifikasi alat beserta dimensi nya adalah sebagai berikut:

1. Ponton

Ponton yang dibuat memiliki luas penampang segidelapan



Gambar 3.3. Ilustrasi dari volume ponton

Perhitungan untuk volume ponton yang tercelup

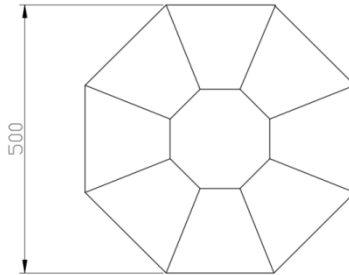
$$m = \rho \cdot V_{tercelup} \quad (3.1)$$

Massa yang digunakan adalah massa dari keseluruhan mekanisme PLTGL-Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul ditambah pemberat yaitu 12,5 Kg jadi volume yang tercelup yaitu

$$V_{tercelup} = \frac{m}{\rho} = \frac{12,5 \text{ Kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,0125 \text{ m}^3$$

Setelah nilai dari volume yang tercelup diperoleh, maka selanjutnya mencari luas dari persegi 8

$$L = 2R^2\sqrt{2} \quad (3.2)$$



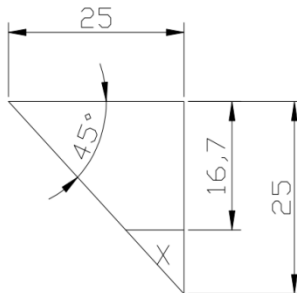
Gambar 3.4 Bentuk segi delapan (*Octagonal*)

$$L = 2 \cdot (0,25 \text{ m})^2 \cdot \sqrt{2}$$

$$= 0,1767 \text{ m}^2$$

Kemudian mencari volume ponton bagian bawah yang dengan menggunakan volume segitiga

$$V = \frac{1}{3} \cdot L \text{ alas} \cdot t \quad (3.3)$$



Gambar 3.5 Segitiga

$$V = \frac{1}{3} \cdot 0,1767 \text{ m}^2 \cdot 0,25 \text{ m}$$

$$= 0,0147 \text{ m}^3$$

Selanjutnya mencari volume dari segitiga X

$$V = \frac{1}{3} \cdot 0,1767 \text{ m}^2 \cdot 0,083 \text{ m}$$

$$= 6,69 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V_{tot} = 0,0147 \text{ m}^3 - 6,69 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 0,014 \text{ m}^3$$

untuk menghitung volume ponton yang tidak tercelup

$$\begin{aligned}
 V_{tdk \text{ tercelup}} &= V_{tot} - V_{tercelup} \\
 &\quad (3.4) \\
 &= 0,014 \text{ m}^3 - 0,0125 \text{ m}^3 \\
 &= 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan tinggi ponton yang tidak tercelup

$$\begin{aligned}
 V_{tdk \text{ tercelup}} &= \frac{1}{3} L \text{ alas} \cdot t \\
 &\quad (3.5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{V_{tdk \text{ tercelup}} \cdot 3}{\text{Luas alas}} \\
 &= \frac{1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{0,176 \text{ m}^2} = 0.025 \text{ m atau } 2,5 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

2. Generator dan Gearbox

Generator yang digunakan pada penelitian PLTGL – Sistem Pontong Dengan Tiga Bandul ini adalah motor AC yang putarannya bolak balik. Motor AC dan *gearbox* ini dapat di-*setting* dengan tiga kecepatan yang berbeda, berikut ini adalah tabel dari spesifikasi motor AC dan *gearbox*.

Tabel 3.1. Spesifikasi *gearbox* dan motor AC

No	putaran (rpm)	Tegangan (mV)
1	36	75,5
2	62	152,6
3	140	384,38

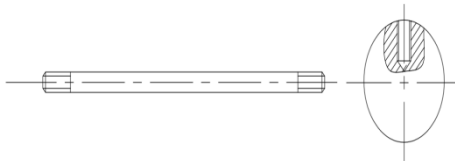
Rangkaian motor dan *gearbox* yang digunakan pada penelitian ini seperti pada Gambar 3.4



Gambar 3.6 Rangkaian motor dan *gearbox* pada PLTGL sistem ponton tiga bandul

3. Massa dan Panjang Lengan Bandul

Pendulum atau bandul digunakan sebagai transmisi perubah gerak gelombang menjadi gerak translasi, yang menggerakkan poros utama kemudian diteruskan ke roda gigi sehingga memutar generator



Gambar 3.7 Bandul dan Lengan Bandul

Berdasar dari referensi PLTGL - SB Zamrisyaf yang memiliki panjang lengan ponton 2 m dan massa 10 kg. Didapatkan standar penelitian laboratorium dengan skala 1:20, dimensi lengan bandul menjadi 100 mm dan massa pendulum 500 gr. Lengan pendulum terbuat dari besi berbentuk silinder pejal dengan diameter 4 mm dan bandul terbuat besi dengan bentuk silinder pejal. Volume bandul dapat dicari dengan rumus sebagai berikut.

$$Volume\ bandul = \frac{massa\ bandul}{\rho\ besi}$$

Untuk massa jenis dari besi (ρ) 7950 kg/m³. Dari perhitungan diperoleh dimensi bandul tersebut adalah diameter 50 mm dengan

tinggi 20 mm. Berdasar penelitian yang dilakukan oleh Ario Pratama menunjukan bahwa dengan menggunakan range massa 100 gram (gr) pada masing – masing variasi telah memberikan efek signifikan untuk dilakukan analisa dengan membandingkan panjang lengan bandulnya sebesar 1 : 23 (data keadaan stabil). Jarak panjang lengan yang telah diteliti sebesar 4 cm.

3.1.4. Pengujian Kelayakan

Pengujian kelayakan dimaksudkan untuk memastikan bahwa alat ponton dapat bekerja dengan baik. Jika ponton yang sudah dirakit tidak sesuai dengan tujuan maka dilakukan perakitan atau perencanaan ulang.

3.1.5. Penentuan Variasi Pengujian

Berdasarkan rumus frekuensi natural seperti pada persamaan 2.25 didapatkan variasi panjang lengan dan massa bandul seperti pada tabel 3.2 di bawah ini.

Tabel 3.2. Perencanaan panjang lengan dan massa bandul

Variasi (ke -)	Massa (gr)	Lengan (cm)
1.	92,1	22
2.	78,5	19
3.	66	16

3.1.5.1. Variasi Massa Bandul

Pada pengujian ini penggunaan massa bandul dibatasi untuk 3 variasi dengan variabel massa m1, m2, m3. Pemilihan ini berdasar pada penyesuaian terhadap mekanisme dan dimensi dari Ponton PLTGL - STB.

3.1.5.2. Variasi Panjang Lengan

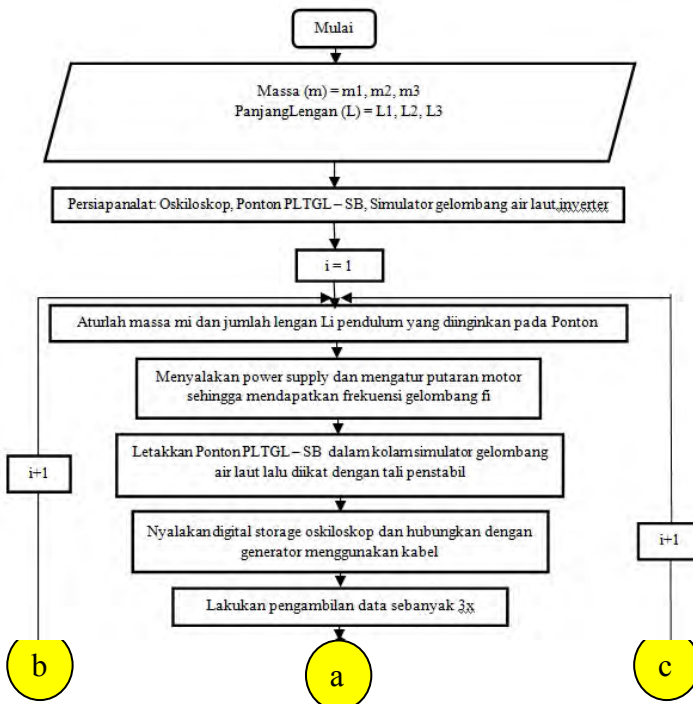
Pada pengujian ini, panjang lengan bandul yang akan diberikan pada prototipe PLTGL – STB menyesuaikan dimensi ponton sehingga didapatkan ukuran sebesar L_1 , L_2 , L_3 .

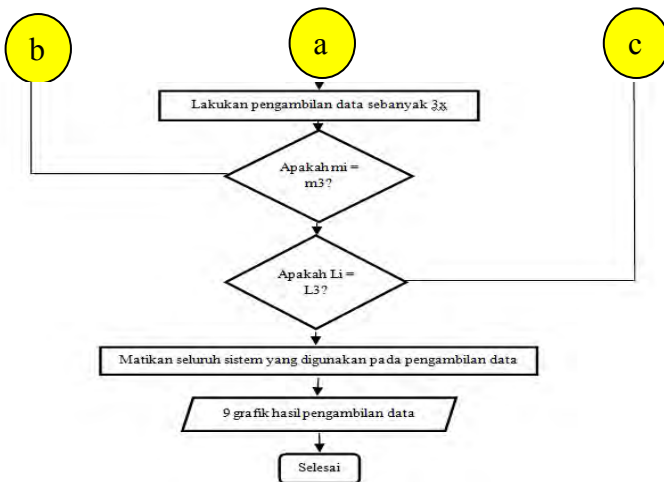
3.1.6. Pengambilan Data

Pengambilan data Ponton PLTGL – Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul dilakukan sebanyak 3 kali untuk setiap masing-masing variasi pengujian yaitu, variasi jumlah bandul yang terpasang dan variasi frequency.

3.1.6.1. Diagram Alir Pengambilan Data

Langkah-langkah dalam mengambil data pengujian PLTGL – Sistem ponton dengan tiga bandul dapat disajikan dalam bentuk diagram alir seperti pada Gambar 3.6.





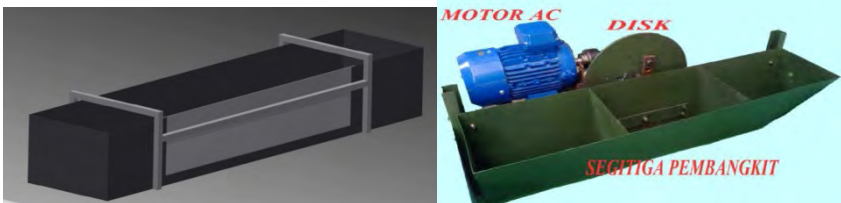
Gambar 3.8. *Flow Chart* pengambilan data

3.1.6.2. Peralatan Pengambilan Data

Untuk melakukan studi eksperimental pada PLTGL – STB ini dibutuhkan beberapa peralatan pengujian.

1. Kolam

Kolam pengujian ini berfungsi sebagai tempat pengujian PLTGL – STB. Kolam inio dilengkapi dengan alat pembuat ombak yang mampu menghasilkan ombak dengan ketinggian 10 cm. Kolam yang digunakan dalam pengujian kali ini seperti pada Gambar 3.6.



Gambar 3.9. Kolam Simulasi Gelombang dan Mekanisme Pembuat Gelombang

Kabel di atas memiliki bagian kutub positif dan negatif dimana hal itu sama dengan kabel yang terdapat pada generator. Dan bagian disisi lain disambungkan pada port oskiloskop.

2. *Digital Storage Oscilloscope*

Digital Storage Oscilloscope dengan merk UNI-T UT2062C seperti pada Gambar 3.10 digunakan untuk merekam data tegangan yang dihasilkan oleh Simulator PLTGL - STB. Data tersebut berupa grafik voltase bangkitan generator terhadap waktu.



Gambar 3.10. *DigitalStorageOscilloscope*

Oskiloskop di atas menggunakan skala untuk data tegangan voltase dan waktu nya. Dimana pembacaan yang dilakukan berupa percepatan karena menggunakan sensor accelerometer dan data di transfer ke dalam flashdisk melalui usb flash drive.

3.1.6.3. Format Lembar Hasil Pengambilan Data

Lembar hasil pengambilan data digunakan untuk mencatat data voltase keluaran yang dihasilkan oleh generator pada Ponton PLTGL – Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul. Massa bandul yang tertera pada lembar pengujian diperoleh dari perhitungan frekuensi natural ombak laut. Besar voltase keluaran dapat dilihat pada layar oskiloskop. Format dari lembar hasil pengambilan data seperti pada Tabel 3.3

Tabel 3.3. Contoh Tabel Data Hasil Pengujian

Panjang Lengan (cm)	Massa Bandul (gram)	Vrms (Volt)
22	92,1	
19	78,5	
16	66	

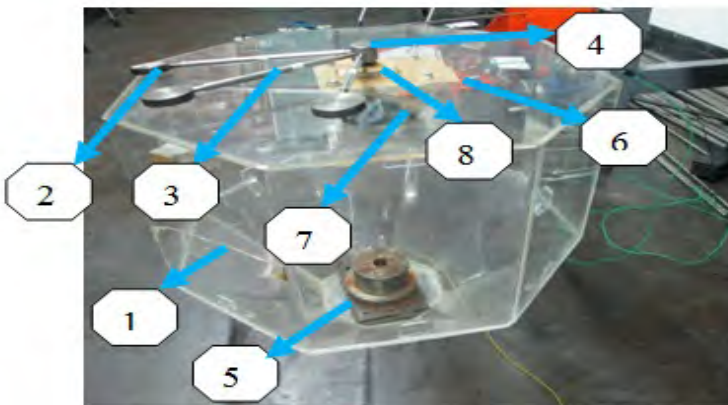
3.1.7. Analisa

Data yang diperoleh dari hasil pengujian adalah berupa grafik dan voltase keluaran yang tertera pada layar osiloskop. Dari data tersebut akan diolah dengan menggunakan matlab untuk menghilangkan *noise* yang terjadi sehingga dapat diketahui daya yang dihasilkan generator.

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 *Prototype Simulator PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul*

Untuk dapat mencapai hasil dari penelitian simulator pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL) sistem ponton dengan tiga bandul , maka diperlukan pembuatan simulator pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem ponton dengan tiga bandul sehingga dapat dilakukan pengambilan data dan penelitian. Berikut ini adalah gambar dari simulator PLTGL sistem ponton dengan tiga bandul.

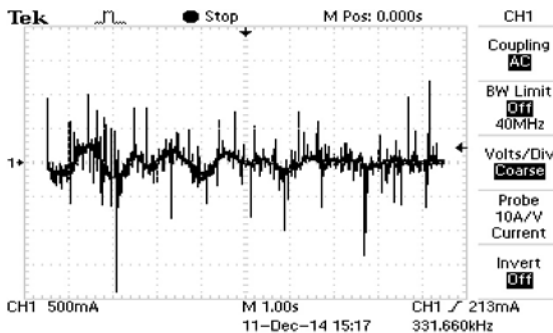


Gambar 4.1 Simulator PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul

- | | |
|------------------|------------------------|
| 1. Ponton | 5. Pembedat |
| 2. Bandul | 6. <i>Gear Box</i> |
| 3. Lengan bandul | 7. Motor AC |
| 4. Poros Utama | 8. <i>Ball Bearing</i> |

Gambar 4.1 menunjukkan Simulator Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul. Sistem ini diletakkan pada sebuah kolam simulator yang menghasilkan ombak buatan. Adapun bagian-bagian dari Simulator ini dipergunakan untuk untuk menunjang penelitian dan pengambilan data pada saat pengujian berlangsung.

Bagian – bagian simulator terdiri dari ponton, bandul, lengan bandul, poros utama, pemberat , *gear box*, *ball Bearing* yang berfungsi sabagai tumpuan mekanisme PLTGL sistem ponton dengan tiga bandul. Motor AC yang digunakan sebagai generator pembangkit listrik. Mekanisme bandul dan lengan bandul terdiri dari 3 buah yang dapat dilepas dan divariasikan.



Gambar 4.2 Data Percobaan pada *Oscilloscope*

Pengujian dan pengambilan data dilakukan dengan menggunakan *Oscilloscope*. Hasil dari *Oscilloscope* akan menunjukkan nilai dari voltase atau daya bangkitan yang dihasilkan pada simulator Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul. Data yang dihasilkan di *Oscilloscope* tidak berupa voltase efektifnya (RMS) sehingga dilaksanakan proses *smoothing* dan *filtering* yang dilakukan menggunakan software Matlab, karena adanya gangguan (*noise*) saat pengambilan data

4.2 Analisa Teoritis

4.2.1 Contoh Perhitungan $L = 0,22 \text{ m}$

Diketahui :

$$\text{Massa Bandul (M)} = 0,091 \text{ kg}$$

$$\text{Panjang Lengan (L)} = 0,22 \text{ m}$$

$$\text{Frekuensi Inverter (F)} = 12 \text{ Hz}$$

$$\text{Periode gelombang (T)} = 0,8306 \text{ sekon}$$

$$\text{Tinggi gelombang (H)} = 0,0784 \text{ m}$$

$$\text{Panjang gelombang } (\lambda) = 1,08 \text{ m}$$

$$\text{Massa jenis } (\rho) = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Percepatan Gravitasi (g)} = 9,81 \text{ kg m/s}^2$$

Penyelasaan :

a. Mencari daya gelombang

$$\begin{aligned} P_{\text{Wave}} &= \frac{\rho \cdot g^2 H^2 T}{32\pi} \\ &= \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (9,81 \text{ kg } \frac{\text{m}}{\text{s}^2})^2 \cdot (0,0784 \text{ m})^2 \cdot 0,8306 \text{ s}}{32 \cdot 3,14} \\ &= \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 96,2361 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 0,00615 \text{ m}^2 \cdot 0,8306 \text{ s}}{100,48} \\ &= 4,893 \text{ watt} \end{aligned}$$

b. Mencari gaya gelombang

$$\begin{aligned} F_{\text{Wave}} &= \frac{P_{\text{Wave}} \cdot T}{\lambda} \\ &= \frac{4,893 \text{ watt} \cdot 0,8306 \text{ s}}{1,08 \text{ m}} \\ &= 3,763 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\text{c. } F_{\text{generated}} = \sum F = (F_{\text{Wave}} + F_{\text{bouyancy}} - F_{\text{gravitasi}})$$

$$F_{\text{generated}} = F_{\text{wave}} = 3,763 \text{ N}$$

4.2.2 Contoh Perhitungan Massa Bandul Yang Digunakan

Untuk mencari massa bandul menggunakan persamaan 2.25 dengan menggunakan periode dari gelombang laut yang ada di Indonesia yaitu antara 5-15 detik maka frekuensi natural (ωn) dari gelombang laut yaitu $\omega n = 2\pi \frac{1}{T}$

Diketahui :

$$m = 0,03 \text{ kg}$$

$$l = 0,22 \text{ m}$$

$$g = 9,81 \text{ kg m/s}^2$$

Penyelesaian :

- a. Mencari Massa Bandul (M)

$$\begin{aligned} \omega n &= \sqrt{\frac{M+m/2}{M+m/3} \cdot \frac{g}{l}} \\ M &= \frac{m \left[3 - 8 \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 \cdot \frac{l}{g} \right]}{6 \left[\left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \cdot \frac{l}{g} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,04 \text{ kg} \left[3 - 8 \left(\frac{3,14}{10} \right)^2 \cdot \frac{0,22 \text{ m}}{9,81 \text{ kg m/s}^2} \right]}{6 \left[\left(\frac{2 \cdot 3,14}{10} \right)^2 \cdot \frac{0,22 \text{ m}}{9,81 \text{ kg m/s}^2} - 1 \right]} = 0,0921 \text{ Kg} \end{aligned}$$

Jadi, massa bandul (M) yang digunakan untuk panjang lengan 0,22 m yaitu 0,0921 kg selanjutnya massa bandul untuk panjang lengan 0,19 m dan 0,16 m, menggunakan perhitungan yang sama.

4.2.3 Contoh perhitungan Rpm

Efisiensi mekanisme pada saat pemasangan 3 bandul dengan panjang lengan 22 mm, 19 mm, 16 mm sebesar 0.536 Volt pada frekuensi 12 Hz

Diketahui

$$V_{rms} = 0,536 \text{ V}$$

$$W_p = 12,5 \text{ Kg}$$

$$F_w = 3,763 \text{ N}$$

Penyelesaian

a. Mencari Rpm

Untuk mencari rpm digunakan spesifikasi generator yang digunakan seperti pada Gambar 4.8

$$n = \frac{V_{rms} + 31,42 \text{ mV}}{2,97 \text{ mV}} = \frac{536 \text{ mV} + 31,42 \text{ mV}}{2,97 \text{ mV}} = 191,05 \text{ rpm}$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 191,05}{60} = 19,99 \text{ rad/s}$$

b. Mencari Torsi Mekanisme

$$T = W_p L_1 \sin \theta + F_w L_1 \cos \theta$$

$$= 12,5 \text{ Kg} \cdot 0,7 \text{ m} \sin 15^\circ + 3,763 \text{ N} \cdot 0,7 \text{ m} \cos 15^\circ$$

$$= 4,81 \text{ Nm}$$

c. Mencari daya Mekanisme

$$P = T \cdot \omega$$

$$= 4,81 \text{ Nm} \cdot 19,99 \text{ rad/s}$$

$$= 96,15 \text{ watt}$$

d. Efisiensi Mekanisme (η)

$$\eta_{eff} = \frac{P_{Mekanisme}}{P_{Wave}} \times 100 \%$$

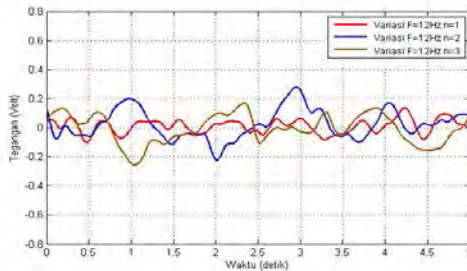
$$= \frac{96,15 \text{ watt}}{4,893 \text{ watt}} \times 100 \% = 19,65 \%$$

4.3 Analisa Eksperimen

4.3.1 Variasi Jumlah Lengan pada F = 12 Hz

Grafik dibawah adalah grafik yang menunjukkan perubahan voltase yang terjadi selama 5 detik pada frekuensi 12 Hz untuk variasi Jumlah Lengan (n), yaitu lengan 1 dengan panjang lengan 22 mm, lengan 2 dengan panjang lengan 19 mm dan lengan 3 dengan panjang lengan 16 mm, pada frekuensi yang sama. Garis merah menunjukkan grafik perubahan voltase dengan jumlah 1 lengan dan panjang lengan (L = 22 mm), garis biru untuk jumlah 2 lengan dan panjang lengan (L = 22 mm) dan (L =

19 mm) garis coklat untuk jumlah 3 lengan dengan panjang lengan ($L = 22$ mm) ($L = 19$ mm) ($L = 16$ mm)



Gambar 4.3 Grafik Variasi Jumlah Lengan pada $F=12$ Hz

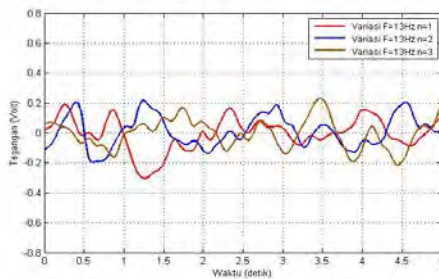
Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa voltase terbesar yang ditunjukkan oleh amplitudo (A) sebesar 0.536 Volt terdapat pada pemasangan 3 bandul dengan panjang lengan 22 mm, 19 mm, 16 mm, kemudian pemasangan 2 bandul dengan panjang lengan 22 mm dan 19 mm dengan amplitudo (A) sebesar 0.513 Volt dan penyimpangan terkecil pada pemasangan 1 bandul dengan panjang lengan 22 mm sebesar 0.504 Volt.

Berdasarkan persamaan $X(t) = A \cdot \cos(\omega_n t - \theta)$ maka, semakin besar nilai A nilai $\cos(\omega_n t - \theta)$ akan semakin kecil, hal ini berarti nilai ω_n semakin besar, sedangkan dari persamaan 2.18 menyatakan bahwa semakin banyak jumlah bandul maka nilai ω_n akan semakin besar. Dari kedua persamaan tersebut dapat dinyatakan bahwa hubungan antara jumlah bandul (n) berbanding lurus dengan amplitudo (A) dimana nilai amplitudo pada grafik dinyatakan dalam voltase.

Dari hasil yang ditunjukkan pada grafik dan teori yang ada maka dapat disimpulkan bahwa hasil eksperimen memenuhi teori yang ada yaitu penyimpangan terbesar senilai 0.536 Volt terjadi pada pemasangan 3 bandul dengan panjang lengan 22 mm, 19 mm, 16 mm.

4.3.2 Variasi Jumlah Lengan pada $F = 13 \text{ Hz}$

Grafik dibawah adalah grafik yang menunjukkan perubahan voltase yang terjadi selama 5 detik pada frekuensi 13 Hz untuk variasi Jumlah Lengan (n), yaitu lengan 1 dengan panjang lengan 22 mm, lengan 2 dengan panjang lengan 19 mm dan lengan 3 dengan panjang lengan 16 mm, pada frekuensi yang sama. Garis merah menunjukkan grafik perubahan voltase dengan jumlah 1 lengan dan panjang lengan ($L = 22 \text{ mm}$), garis biru untuk jumlah 2 lengan dan panjang lengan ($L = 22 \text{ mm}$) dan ($L = 19 \text{ mm}$) garis coklat untuk jumlah 3 lengan dengan panjang lengan ($L = 22 \text{ mm}$), ($L = 19 \text{ mm}$), ($L = 16 \text{ mm}$)



Gambar 4.4 Grafik Variasi Jumlah Lengan pada $F=13 \text{ Hz}$

Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa voltase terbesar yang ditunjukkan oleh amplitudo (A) sebesar 0.83 Volt terdapat pada pemasangan 3 bandul dengan panjang lengan 22 mm, 19 mm, 16 mm, kemudian pemasangan 2 bandul dengan panjang lengan 22 mm dan 19 mm dengan amplitudo (A) sebesar 0.78 Volt dan penyimpangan terkecil pada pemasangan 1 bandul dengan panjang lengan 22 mm sebesar 0.622 Volt.

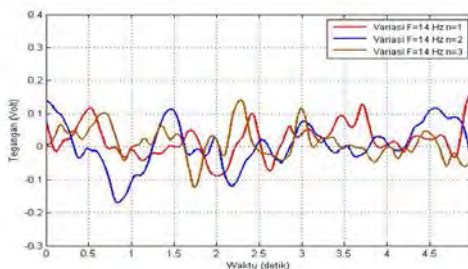
Berdasarkan persamaan $X(t) = A \cdot \cos(\omega_n t - \theta)$ maka, semakin besar nilai A nilai $\cos(\omega_n t - \theta)$ akan semakin kecil, hal ini berarti nilai ω_n semakin besar, sedangkan dari persamaan 2.18 menyatakan bahwa semakin banyak jumlah bandul maka

nilai ω_n akan semakin besar. Dari kedua persamaan tersebut dapat dinyatakan bahwa hubungan antara jumlah bandul (n) berbanding lurus dengan amplitudo (A) dimana nilai amplitudo pada grafik dinyatakan dalam voltase.

Dari hasil yang ditunjukkan pada grafik dan teori yang ada maka dapat disimpulkan bahwa hasil eksperimen memenuhi teori yang ada yaitu penyimpangan terbesar senilai 0.83 Volt terjadi pada pemasangan 3 bandul dengan panjang lengan 22 mm, 19 mm, 16 mm.

4.3.3 Variasi Jumlah Lengan pada $F = 14 \text{ Hz}$

Grafik dibawah adalah grafik yang menunjukkan perubahan voltase yang terjadi selama 5 detik pada frekuensi 13 Hz untuk variasi Jumlah Lengan (n), yaitu lengan 1 dengan panjang lengan 22 mm, lengan 2 dengan panjang lengan 19 mm dan lengan 3 dengan panjang lengan 16 mm, pada frekuensi yang sama. Garis merah menunjukkan grafik perubahan voltase dengan jumlah 1 lengan dan panjang lengan ($L = 22 \text{ mm}$), garis biru untuk jumlah 2 lengan dan panjang lengan ($L = 22 \text{ mm}$) dan ($L = 19 \text{ mm}$) garis coklat untuk jumlah 3 lengan dengan panjang lengan ($L = 22 \text{ mm}$), ($L = 19 \text{ mm}$), ($L = 16 \text{ mm}$)



Gambar 4.5 Grafik Variasi Jumlah Lengan pada $F=14 \text{ Hz}$

Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 menunjukkan bahwa voltase terbesar yang ditunjukkan oleh amplitudo (A)

sebesar 0.82 Volt terdapat pada pemasangan 3 bandul dengan panjang lengan 22 mm, 19 mm, 16 mm, kemudian pemasangan 2 bandul dengan panjang lengan 22 mm dan 19 mm dengan amplitudo (A) sebesar 0.67 Volt dan penyimpangan terkecil pada pemasangan 1 bandul dengan panjang lengan 22 mm sebesar 0.598 Volt.

Berdasarkan persamaan $X(t) = A \cdot \cos(\omega_n t - \theta)$ maka, semakin besar nilai A nilai $\cos(\omega_n t - \theta)$ akan semakin kecil, hal ini berarti nilai ω_n semakin besar, sedangkan dari persamaan 2.18 menyatakan bahwa semakin banyak jumlah bandul maka nilai ω_n akan semakin besar. Dari kedua persamaan tersebut dapat dinyatakan bahwa hubungan antara jumlah bandul (n) berbanding lurus dengan amplitudo (A) dimana nilai amplitudo pada grafik dinyatakan dalam voltase.

Dari hasil yang ditunjukkan pada grafik dan teori yang ada maka dapat disimpulkan bahwa hasil eksperimen memenuhi teori yang ada yaitu penyimpangan terbesar senilai 0.82 Volt terjadi pada pemasangan 3 bandul dengan panjang lengan 22 mm, 19 mm, 16 mm

4.4 Analisa Pengaruh Variasi

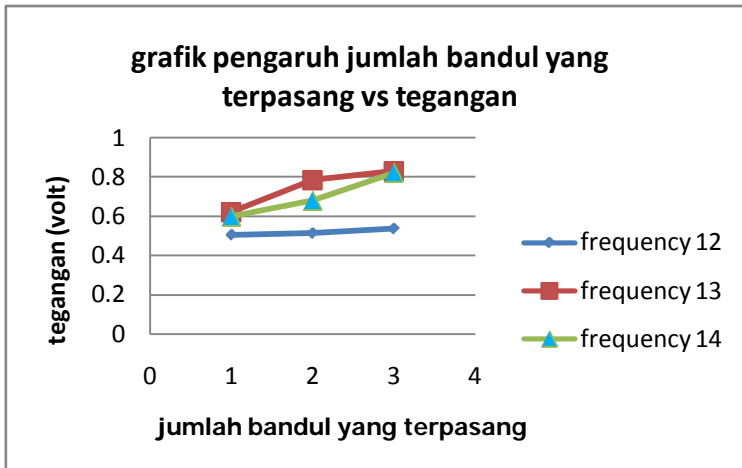
Analisa ini dilakukan untuk mengetahui variasi yang memiliki efek dominan terhadap besar daya yang dihasilkan. Analisa dilaksanakan pada 2 variasi yaitu Pengaruh Frekuensi, dan pengaruh pemasangan jumlah bandul terhadap besar tegangan (Volt) yang dihasilkan. Cara mencari variasi yang memiliki efek paling dominan adalah membandingkan besar tegangan pada variasi yang dilakukan terhadap besar tegangan yang dihasilkan dalam presentase (%). Contohnya adalah untuk mengetahui pengaruh variasi frekuensi terhadap besar tegangan maka dilaksannakan perhitungan pada panjang lengan yang sama di frekuensi yang berbeda. Untuk mengetahui pengaruh jumlah bandul terpasang, maka variabel yang dihitung adalah perubahan

tegangan disetiap penambahan jumlah bandul pada frekuensi yang sama. Sehingga jika dihitung menghasilkan presentase .

4.4.1 Analisa Pengaruh Variasi Jumlah Bandul Yang Terpasang Terhadap Tegangan

Tabel 4.1 Data Eksperimen Variasi Jumlah Bandul Yang Terpasang

Pengaruh Variasi Jumlah Bandul Yang Terpasang			
Variasi			Kesimpulan
Frekuensi (Hz)	Jumlah bandul terpasang (n)	Vrms (volt)	
12	1	0.504	Jumlah bandul bertambah voltase naik 5,97%
	2	0,513	
	3	0,536	
13	1	0,622	Jumlah bandul bertambah voltase naik 25,06%
	2	0,78	
	3	0,83	
14	1	0,598	Jumlah bandul bertambah voltase naik 27,07%
	2	0,67	
	3	0,82	



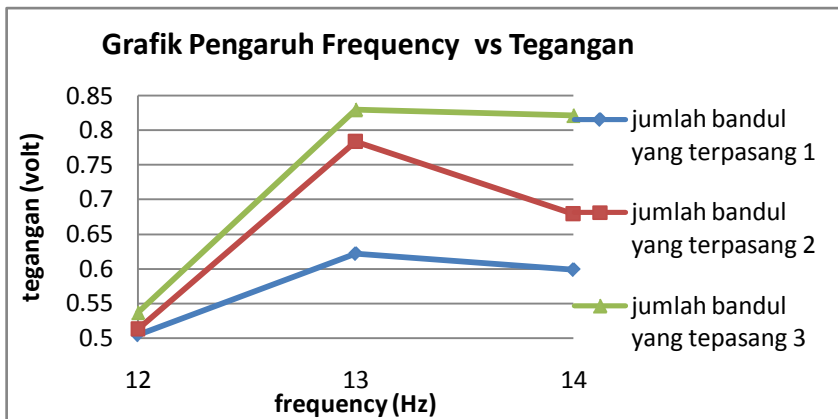
Gambar 4.6 Grafik Pengaruh Variasi jumlah bandul yang terpasang vs tegangan

Grafik pada gambar 4.6 adalah grafik perbandingan antara jumlah bandul yang terpasang vs tegangan. Grafik pengaruh variasi jumlah bandul yang terpasang dibuat untuk mengetahui pengaruh jumlah bandul yang terpasang terhadap tegangan yang dihasilkan pada frekuensi yang sama. Berdasarkan gambar 4.7 dapat diambil kesimpulan bahwa jumlah bandul yang terpasang mempengaruhi tegangan yang dihasilkan, yaitu semakin banyak bandul yang terpasang pada mekanisme PLTGL – Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul semakin besar tegangan yang dihasilkan. Dimana dengan memasang bandul dengan jumlah yang lebih banyak dapat meningkatkan nilai tegangan maksimum hingga 27,07% nilai tegangan. Dimana kenaikan rata-rata untuk pengaruh panjang lengan adalah 10,52%.

4.4.2 Analisa Pengaruh Variasi Frekuensi Terhadap Tegangan

Tabel 4.2 Data Eksperimen Variasi Frekuensi

Pengaruh Frekuensi			
Variasi			Kesimpulan
Jumlah Bandul yang terpasang (n)	Frekuensi (Hz)	rms (volt)	
1	12	0.504	Frekuensi naik voltase naik 15,7%
	13	0,622	
	14	0,598	
2	12	0,513	Frekuensi naik voltase naik 23,43%
	13	0,78	
	14	0,67	
3	12	0,536	Frekuensi naik voltase naik 34,63%
	13	0,83	
	14	0,82	



Gambar 4.7 Grafik Pengaruh variasi *frequency* vs Tegangan

Grafik pada gambar 4.7 adalah grafik Pengaruh *frequency* vs tegangan. Grafik pengaruh variasi *frequency* dibuat untuk mengetahui pengaruh variasi *frequency* terhadap tegangan yang dihasilkan pada jumlah bandul yang terpasang. Berdasarkan gambar 4.9 dapat diambil kesimpulan bahwa variasi *frequency* mempengaruhi tegangan yang dihasilkan, yaitu semakin tinggi *frequency* pada mekanisme PLTGL – Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul semakin besar tegangan yang dihasilkan. Namun pada *frequency* 14 Hz tegangan yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan pada saat *frequency* 13 Hz hal ini dikarenakan inverter yang digunakan kurang baik sehingga pada saat pengujian ombak yang dihasilkan pada *frequency* 13 Hz lebih besar. Adapun kenaikan rata-rata untuk pengaruh variasi *frequency* adalah 9,645%.

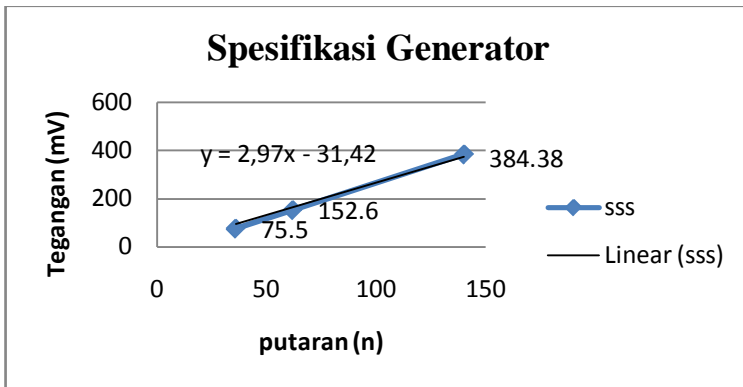
Dari kedua variasi tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa variasi penambahan jumlah bandul memberikan efek paling dominan terhadap peningkatan tegangan, yaitu dapat meningkatkan tegangan maksimum sebesar 10,52%. dari kondisi awalnya. Variasi Frekuensi memberikan efek 9,645%. terhadap peningkatan tegangan.

4.5 Analisa Pengaruh Variasi Terhadap Putaran

Analisa ini dilakukan untuk mengetahui variasi yang memiliki efek dominan terhadap kecepatan putaran(n) yang dihasilkan analisa dilakukan pada 2 variasi yaitu pada pemasangan jumlah bandul (n) dan frekuensi gelombang laut terhadap tegangan (voltase) yang dihasilkan simulator PLTGL- Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul kemudian tegangan tersebut diubah kedalam kecepatan putaran(n) dengan menggunakan spesifikasi kecepatan putaran dari generator seperti pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Spesifikasi kecepatan Putaran Generator

No	Putaran (rpm)	Tegangan (mV)
1	36	75,5
2	62	152,6
3	140	384,38

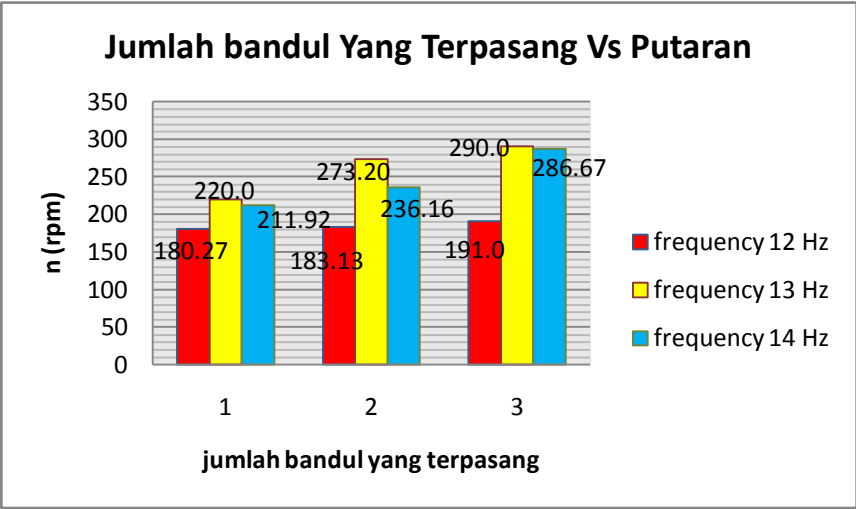


Gambar 4.8 Grafik Spesifikasi Generator

Cara mencari variasi yang memiliki efek paling dominan adalah membandingkan besar putaran pada variasi yang dilakukan. Untuk mengetahui pengaruh variasi frekuensi terhadap kecepatan putaran maka dilakukan perhitungan pada jumlah bandul yang terpasang di frekuensi yang berbeda. Untuk mengetahui pengaruh jumlah bandul yang terpasang, maka variabel yang dihitung adalah perubahan tegangan disetiap pertambahan jumlah bandul yang terpasang pada frekuensi yang sama. Untuk perhitungan kecepatan putaran (n) menggunakan persamaan $y=2,97x-31,42$ persamaan tersebut didapatkan dari spesifikasi generator AC yang digunakan sehingga didapatkan persamaan untuk mencari kecepatan putaran yaitu $n = \frac{V_{rms} + 31,42}{2,97}$.

Tabel 4.4 Data Eksperimen Pengaruh variasi Jumlah Bandul terhadap putaran (n)

Jumlah Bandul yang terpasang (n)	F(Hz)	vrms(V)	Vrms (mV)	putaran (Rpm)
1	12	0.504	504	180,27
	13	0,622	622	220
	14	0,598	598	211,92
2	12	0,513	513	183,3
	13	0,78	780	273,2
	14	0,67	670	236,16
3	12	0,536	536	191
	13	0,83	830	290
	14	0,82	820	286,67

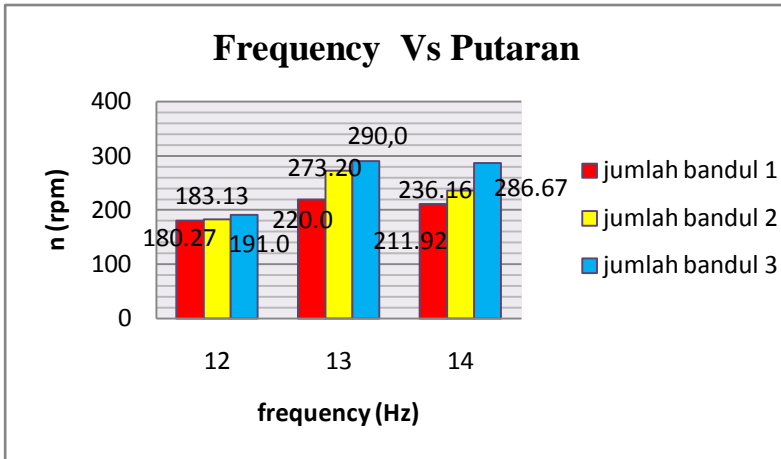


Gambar 4.9 Grafik Jumlah bandul Vs Putaran

Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 adalah hasil eksperimen yang dilakukan pada frekuensi gelombang yang sama yaitu dengan jumlah bandul yang terpasang berbeda. Frekuensi 12 Hz (grafik warna merah), jumlah bandul yang terpasang 1 menghasilkan kecepatan putaran (n) terbesar yaitu 180,27 rpm kemudian jumlah bandul yang terpasang 2 menghasilkan $n = 183,13$ rpm dan terakhir jumlah bandul yang terpasang 3 dengan $n = 191$ rpm. Frekuensi 13 Hz (grafik warna kuning), jumlah bandul yang terpasang 1 menghasilkan kecepatan putaran (n) terbesar yaitu 220 rpm kemudian jumlah bandul yang terpasang 2 menghasilkan $n = 273,2$ rpm dan terakhir jumlah bandul yang terpasang 3 dengan $n = 290$ rpm. Frekuensi 14 Hz (grafik warna biru), jumlah bandul yang terpasang 1 menghasilkan kecepatan putaran (n) terbesar yaitu 211,92 rpm kemudian jumlah bandul yang terpasang 2 menghasilkan $n = 273,2$ rpm dan terakhir jumlah bandul yang terpasang 3 dengan $n = 286,67$ rpm.

Berdasarkan persamaan $n = \frac{V_{rms} + 2,97}{31,42}$ maka hubungan antara v_{rms} dan putaran berbanding lurus hal ini menyatakan bahwa semakin besar nilai v_{rms} maka nilai putaran akan semakin besar.

Dari hasil yang ditunjukkan pada grafik dan teori yang ada, dapat disimpulkan bahwa putaran terbesar terjadi pada pemasangan jumlah bandul 3 pada frekuensi 12 Hz dengan nilai $n = 191$ rpm, frekuensi 13 Hz nilai $n = 290$ rpm dan frekuensi 14 Hz yaitu $n = 286,67$ rpm.



Gambar 4.10 Grafik f Vs n

Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 adalah hasil eksperimen yang dilakukan pada jumlah pemasangan bandul yang sama pada frekuensi gelombang berbeda. Jumlah bandul yang terpasang 1 (grafik warna merah), frekuensi 13 Hz menghasilkan kecepatan putaran (n) terbesar yaitu 220 rpm, kemudian frekuensi 14 Hz menghasilkan $n = 211,92$ rpm dan terakhir frekuensi 12 Hz dengan $n = 180,27$ rpm. Jumlah bandul yang terpasang 2 (grafik warna kuning), kecepatan putaran (n) terbesar terjadi pada frekuensi 13 Hz yaitu $n = 273,2$ rpm, kemudian frekuensi 14 Hz menghasilkan $n = 236,16$ rpm dan frekuensi 12 Hz menghasilkan $n = 183,13$ rpm. Panjang lengan 19 cm (grafik warna merah) pada frekuensi 13 Hz menghasilkan $n = 290$ rpm, kemudian frekuensi 14 Hz dengan $n = 286,67$ rpm dan terakhir frekuensi 12 Hz $n = 191$ rpm.

Berdasarkan persamaan $f = \frac{\omega}{2\pi}$ menyatakan bahwa kecepatan sudut ω berbanding lurus dengan frekuensi f sedangkan persamaan $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ menyatakan bahwa semakin besar nilai n maka nilai ω juga akan semakin besar dari kedua persamaan tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai f maka nilai n akan semakin besar.

Dari hasil yang ditunjukkan pada grafik dan teori yang ada dapat disimpulkan bahwa putaran terbesar terjadi pada frekuensi 13 Hz dengan nilai n pada masing-masing pemasangan jumlah bandul 1,2,3 yaitu $n = 220$ rpm, 273,2 rpm, 290 rpm.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari analisa dan pembahasan pada PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul. Dengan variasi jumlah bandul dan frekuensi gelombang didapat kesimpulan sebagai berikut ;

1. Nilai tegangan akan meningkat seiring bertambahnya jumlah bandul pada mekanisme PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul.
2. Nilai tegangan terbesar untuk variasi jumlah bandul 3 ($N=3$) pada frekuensi 13 Hz yaitu sebesar 0,83 volt dan tegangan terkecil pada jumlah bandul 1 ($N=1$) pada frekuensi 12 Hz yaitu 0,504 .
3. Nilai putaran terbesar untuk variasi jumlah bandul 3 ($N=3$) pada frekuensi 13 Hz yaitu sebesar 290 Rpm dan terkecil terkecil pada jumlah bandul 1 ($N=1$) pada frekuensi 12 Hz yaitu 180,27 Rpm .
4. Variasi jumlah bandul memiliki efek dominan dalam peningkatan tegangan. Dimana setiap penambahan mekanisme memberikan tambahan tegangan rata-rata sebesar 10,52 %.
5. Variasi *frequency* memiliki efek lebih kecil dari variasi jumlah bandul yang terpasang dalam peningkatan tegangan. Dimana setiap penambahan mekanisme memberikan tambahan tegangan rata-rata sebesar 9,645%.

5.2 Saran

1. Bearing yang digunakan tahan air sehingga mencegah korosi
2. Simulator pembuat gelombang memiliki peredam yang lebih baik, sehingga mencegah gelombang balik sehingga pengamatan dapat dilakukan lebih lama.

3. Dilakukan proses *alignment* antara poros sehingga didapatkan kesatusumbuan poros yang akan meningkatkan efisiensi pada mekanisme PLTGL-Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul.
4. Pengujian sebaiknya dilakukan di kolam pengujian yang lebih Besar

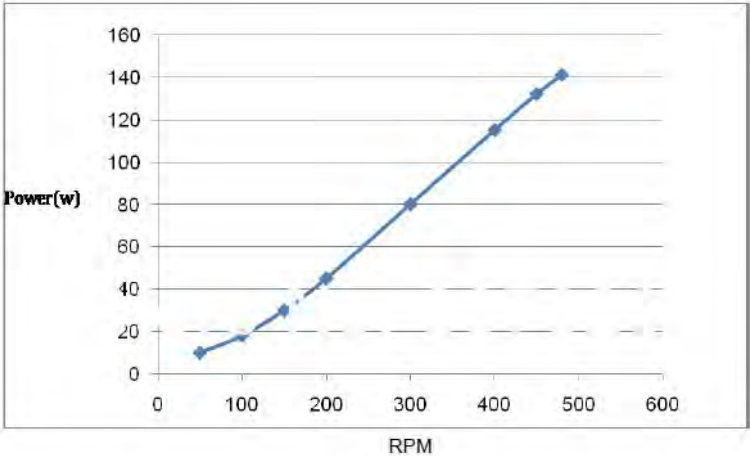
Lampiran 1. Spesifikasi Generator



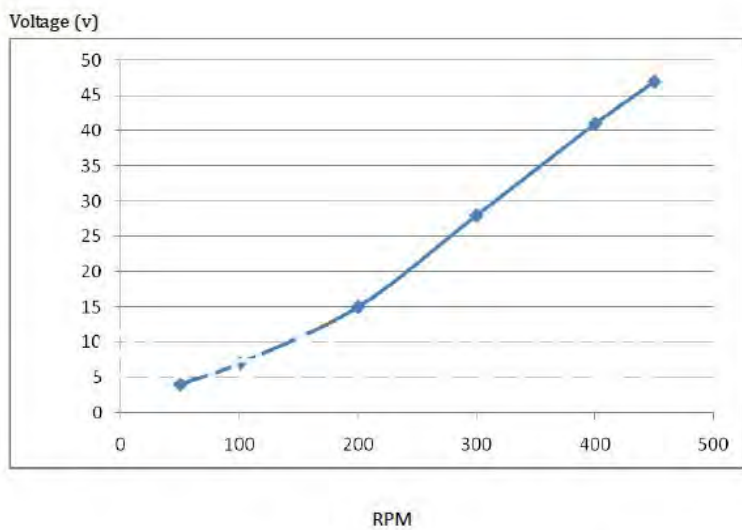
Model	PMG-100	PMG-200	PMG-300	PMG-400	PMG-500	PMG-600
Rated power	100w	200w	300w	400w	500w	600w
Maximum power	130w	230w	350w	450w	550w	650w
Rated voltage	12/24v	12/24v	12/24v	12/24v	12/24v	24v
Rated revolution	450r/m	450 r/m	450 r/m	450 r/m	450 r/m	450 r/m
Shell material	High standard casting Aluminium alloy with TF/T6 heat treatment					
Shaft material	High standard Stainless Steel					
Shaft bearing	High standard NSK 6203					
Magnet material	NdFeB (Neodymium Iron Boron)					
Protection grade	IP 54					
Efficiency	>90%					
Starting torque(N*M)	<0.2	<0.2	<0.3	<0.3	<0.5	<0.5
Net weight	3.5kg	3.5kg	4.5kg	4.5kg	7.5kg	7.5kg
Dimension (height*diameter*shaft)	(one shaft) 65*145*28 mm		(one shaft) 80*145*45mm		(one shaft) 100*175*60mm	
	(two shaft) 65*145*138mm		(two shaft) 80*145*150mm		(two shaft) 100*175*150mm	
Lubrication	Lubricating grease					
Generator	Three-phase ac permanent magnet synchronous generator					

Lampiran 2. Grafik Performa Generator

100w power curve



Grafik Power vs RPM 100W 12V



Grafik Voltage vs RPM 100W 12V

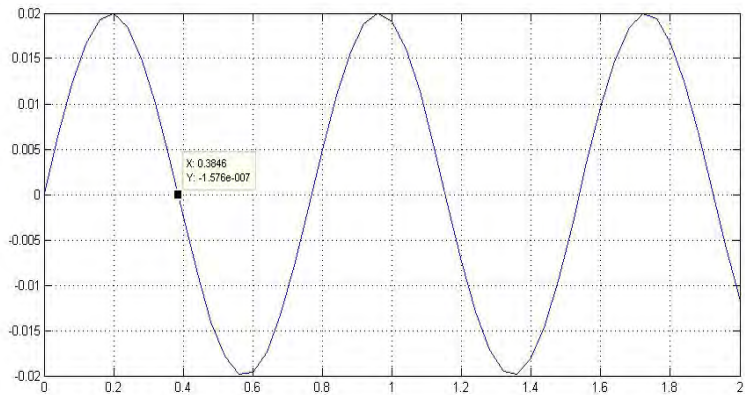
Lampiran 3. Spesifikasi Motor Hidrolik

Type		BMM 8	BMM 12.5	BMM 20	BMM 32	BMM 40	BMM 50
Geometric displacement (cm ³ /rev.)		8.2	12.9	19.9	31.6	39.8	50.3
Max. speed (rpm)	cont.	1950	1550	1000	630	500	400
	int.	2450	1940	1250	800	630	500
Max. torque (N•m)	cont.	11	16	25	40	45	46
	int.	15	23	35	57	70	88
	peak	21	33	51	64	82	100
Max. output (kW)	cont.	1.8	2.4	2.4	2.4	2.2	1.8
	int.	2.6	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
Max. pressure drop (MPa)	cont.	10	10	10	10	9	7
	int.	14	14	14	14	14	14
	peak	20	20	20	16	16	16
Max. flow (L/min)	cont.	16	20	20	20	20	20
	int.	20	25	25	25	25	25
Weight (kg)		1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4

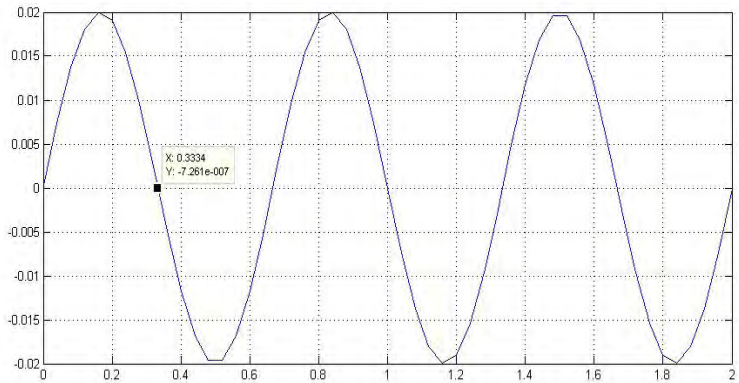
Type		Max.inlet pressure
BMM8-50 (MPa)	cont.	17.5
	int.	22.5

- Continuous pressure:Max. value of operating motor continuously.
- Intermittent pressure:Max. value of operating motor in 5 seconds per minute.
- Peak pressure:Max. value of operating motor in 0.6 second per minute.

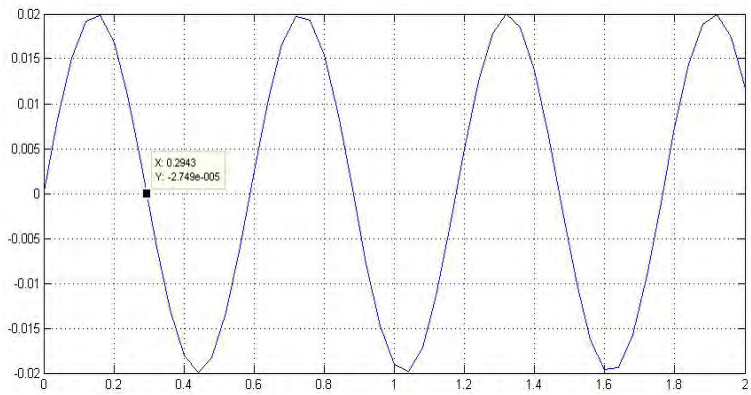
Lampiran 4. Simulasi Respon Eksitasi



Gambar simulasi respon $f = 1.3$ Hz dengan $A = 2$ cm



Gambar simulasi respon $f = 1.5$ Hz dengan $A = 2$ cm






Gambar simulasi respon $f = 1.7 \text{ Hz}$ dengan $A = 2 \text{ cm}$

Lampiran 5. Tabel mencari nilai K dan L_e/D

Table 8.2

Minor Loss Coefficients for Pipe Entrances

Entrance Type		Minor Loss Coefficient, K^a			
Reentrant		0.78			
Square-edged		0.5			
Rounded		r/D	0.02	0.06	≥ 0.15
		K	0.28	0.15	0.04

^aBased on $h_{L_e} = K(\bar{V}^2/2)$, where \bar{V} is the mean velocity in the pipe.

Source: Data from Reference [11].

Table 8.4

Representative Dimensionless Equivalent Lengths (L_e/D) for Valves and Fittings

Fitting Type	Equivalent Length, ^a L_e/D
Valves (fully open)	
Gate valve	8
Globe valve	340
Angle valve	150
Ball valve	3
Lift check valve: globe lift	600
angle lift	55
Foot valve with strainer: poppet disk	420
hinged disk	75
Standard elbow: 90°	30
45°	16
Return bend, close pattern	50
Standard tee: flow through run	20
flow through branch	60

^aBased on $h_{L_e} = f(L_e/D)(\bar{V}^2/2)$.

Source: Data from Reference [11].

(halaman ini sengaja dikosongkan)

RANCANG BANGUN DAN STUDI EKSPERIMEN RESPON DINAMIS MODEL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT SISTEM PONTON DENGAN TIGA BANDUL

Ibrahim AZ dan Harus Laksana Guntur

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: haruslg@me.its.ac.id

Abstrak— Indonesia memiliki potensi energi gelombang laut yang luar biasa yang bisa dimanfaatkan untuk mengatasi masalah krisis energi, terutama di pulau-pulau kecil. Pembangkit listrik tenaga gelombang laut dapat menjadi salah satu alternatif solusi masalah tersebut. Pada penelitian ini akan dilakukan perancangan ulang terhadap sebuah ponton pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL) Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul dengan mengoptimalkan massa dan panjang lengan bandul pada ponton. Pembahasan dari penelitian ini dititik beratkan pada studi eksperimen pengaruh massa dan lengan bandul terhadap putaran yang dihasilkan. Dimana massa dan panjang lengan bandul mempengaruhi pergerakan berputarnya bandul. Sedangkan frekuensi dan amplitudo gelombang air laut yang mengenai tubuh ponton akan menyebabkan gerak naik turun (*pitching*). Analisa pada penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan massa bandul dan panjang lengan bandul. Pada penelitian ini menghasilkan karakteristik putaran bandul konstan yang dihasilkan prototipe Ponton PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul akibat adanya pengaruh variasi massa, dan panjang lengan bandul. Nilai tegangan terbesar untuk variasi jumlah bandul 3 ($N=3$) pada frekuensi 13 Hz yaitu sebesar 0,83 volt dan tegangan terkecil pada jumlah bandul 1 ($N=1$) pada frekuensi 12 Hz yaitu 0,504. Nilai putaran terbesar untuk variasi jumlah bandul 3 ($N=3$) pada frekuensi 13 Hz yaitu sebesar 290 Rpm dan terkecil pada jumlah bandul 1 ($N=1$) pada frekuensi 12 Hz yaitu 180,27 Rpm.

Kata Kunci : Ponton, PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul, Massa bandul, Panjang lengan bandul, Frekuensi dan Amplitudo Gelombang air laut, Energi listrik.

I. PENDAHULUAN

Indonesia salah satu negara yang memiliki potensi wilayah kelautan yang sangat besar. Dan karena geografis Indonesia pula menyebabkan adanya sumber daya kelautan yang sangat besar pula dan potensi laut yang stabil. Salah satu potensi tersebut adalah energi gelombang laut. Gelombang laut yang berada di Indonesia ada pada sepanjang tahun berbeda halnya seperti di negara lain contohnya Thailand karena gelombang laut di negara tersebut datang dikarenakan adanya badai terlebih dahulu. Hal tersebut merupakan salah satu alasan mengapa Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut ini semakin dikembangkan di Indonesia. Teknologi pengembangan energi dari laut tersebut dapat memecahkan masalah energi listrik sebagai negara kepulauan, apalagi masih banyak

pulau-pulau atau daerah-daerah terpencil yang memerlukan penanganan khusus termasuk penyediaan energi listrik. Teknologi ini dapat memperkuat nilai tawar bangsa Indonesia dalam hal teknologi energi baru dan terbarukan, dan menghadapi isu pemanasan global. Salah satunya dengan pengembangan teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Model 3 B andul dengan panjang lengan yang divariasikan dan massa yang konstan.

Teknologi PLTGL-SB atau Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Bandul yang ada saat ini adalah salah satu teknologi karya Bapak Zamrisyaf SY dari Badan Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero). Dalam Laporan Pekerjaan Tahap I, Studi Pemodelan dan Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandul (PLTGL – SB) kerjasama antara Badan Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) dan Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Institut Teknologi Sepuluh Nopember tahun 2010, dilakukan riset mengenai bentuk PLTGL – SB yang disempurnakan dengan menggunakan 3 lengan yang divariasikan dan dengan massa yang konstan. Kemudian ponton ditempatkan mendatar di atas permukaan air laut. Gelombang laut akan membuat miring ponton datar. Kemiringan ponton datar ini mengakibatkan bandul berputar.

Gerak ponton datar yang cenderung acak atau tidak beraturan diakibatkan oleh datangnya gelombang laut yang menggunakannya yang tidak beraturan pula. Pergerakan ponton datar yang acak ini mempengaruhi perputaran bandul yang berada di atasnya. Perputaran yang terjadi diharapkan akan selalu searah dan menghasilkan Amplitudo dan Frekuensi yang konstan. Sedang belum ada studi tentang respon perputaran bandul tersebut dari penelitian-penelitian mengenai PLTGL sistem 3 bandu

II. URAIAN PENELITIAN

Pada penelitian ini tahapan-tahapan yang harus dilakukan sebelum melakukan pengujian adalah sebagai berikut :

A. Studi Literatur

Terdapat beberapa tinjauan pustaka dalam penelitian ini seperti Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Bandul (PLTGL-SB) oleh Bapak Zamrisyaf. Pada penelitian ini Bapak Zamrisyaf menggunakan ponton yang menyerupai lambung kapal pada umumnya dengan sistem *single* pendulum yang berputar arah horizontal. Dengan menggunakan berat bandul 10 kg, lengan bandul 2 meter, periode gelombang 3 detik, ketinggian gelombang 1.5 meter, dan menggunakan *freewheel* mampu menghasilkan listrik sekitar 125 kw. Dengan dimensi yang digunakan dan

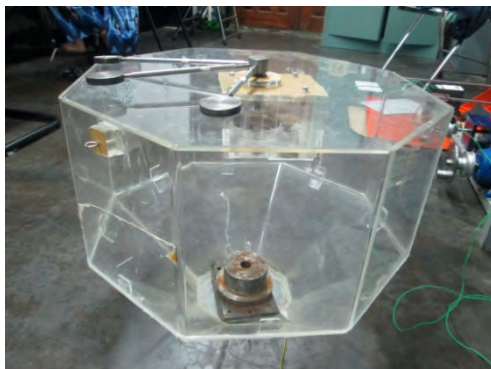
besar gelombang yang ada, hasil listrik ini belum lah optimal.

Studi Eksperimental Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut oleh Hendro Agus dan Urip Mudjiono ini menggunakan pelampung, dimana energi potensial yang dihasilkan oleh gelombang laut mengangkat pelampung untuk memutar generator. Untuk prinsip kerja dari PLTGL tersebut adalah adanya gelombang laut yang bertekanan, maka tekanan tersebut akan menggerakkan pelampung yang terhubung dengan tuas. Dari gerakan pelampung kemudian dikonversi menjadi putaran mekanik satu arah melalui bearing satu arah putaran (*One Way Clutch Bearing, Single Direction Bearing*). Hasil putaran mekanik satu arah dari bearing satu arah putaran (*One Way Clutch Bearing, Single Direction Bearing*) diperbesar putarannya melalui susunan rasio gear box, sistim transmisi dan roda. Dari hasil putaran satu arah yang telah diperbesar putarannya baru kemudian memutar generator. Dari hasil putaran generator dihasilkan energi listrik yang dihasilkan dari gerak pelampung tersebut

Studi Eksperimental Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang laut oleh Putu Risti Nirmalasari ini menggunakan ponton dengan sistem single pendulum, dimana energi potensial yang dihasilkan oleh gelombang laut memutar pendulum untuk memutar generator. Untuk prinsip kerja dari PLTGL-SSP tersebut adalah energi dari gelombang laut dengan menggunakan putaran pendulum menghasilkan energi mekanik untuk memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik. Sebelum masuk ke generator, batang pendulum dihubungkan terlebih dahulu pada *gearbox* untuk meningkatkan putaran. tegangan yang dihasilkan dengan amplitudo tetap sebesar 5.35 cm dan frekuensi tetap sebesar 1.487 Hz, rata-rata hasil perhitungan adalah 0.07 Volt dengan panjang lengan 6,8,10 cm dan massa pendulum 50, 80, 100 gram.

B. Perencanaan Dan Pembuatan Mekanisme

Tahap perencanaan berfungsi untuk membuat desain model Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul. Mekanisme model PLTGL ini memvariasikan massa dan panjang lengan pendulum. Dimana variasi massa yang digunakan sebesar 66 gr, 78,5 gr dan 92,1gr. Dan panjang lengan pendulum yang divariasikan sebesar 16 cm, 19 cm dan 22 cm.



Gambar .1.model mekanisme PLTGL sistem ponton dengan tiga bandul

C. Pengujian PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul

Proses pengujian untuk pertama kali dilakukan dengan memasang 1 bandul kemudian memvariasikan frekuensi inverter, dimana frekuensi inverter yang digunakan ialah sebesar 12 Hz. . Atur *Oscilloscope* untuk merekam data

voltage output dari model mekanisme PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul. Data yang direkam disimpan pada flashdisk untuk kemudian diolah menggunakan *software*. Setelah semua siap dilakukan pengujian pertama pada pemasangan lengan bandul 1 dengan variasi frekuensi 12 Hz,13 Hz, 14 Hz. kemudian berlanjut ke pemasangan jumlah bandul 2 dan 3 dengan variasi frekuensi yang sama.

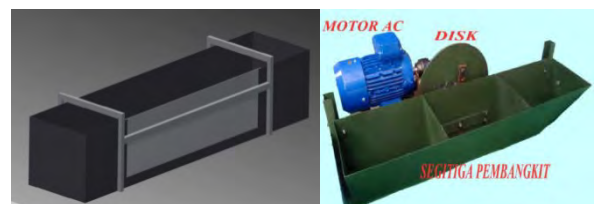
D. Pengelolaan Data Pengujian

Data yang diperoleh dari hasil pengujian diolah sehingga hasil pengujian ditunjukkan dalam grafik pemasangan jumlah bandul fungsi tegangan.

E. Peralatan Yang Digunakan

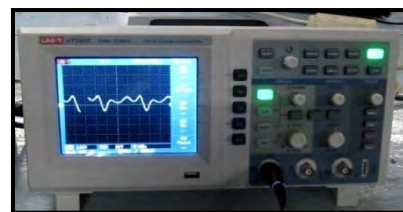
Untuk melakukan penelitian pada PLTGL sistem ponton dengan tiga bandul ini dibutuhkan beberapa peralatan pengujian.

a. Kolam



Gambar .2. kolam simulasi gelombang dan mekanisme pembuat gelombang

b. Digital storage oscilloscope



Gambar .3. Digital storage Oscilloscope

c. Lembar pengambilan data

Tabel 1.

Spesifikasi komponen yang divariasikan

Panjang Lengan (cm)	Massa Bandul (gram)
22	92,1
19	78,5
16	66

III. HASIL DAN ANALISA

A. Perhitungan

Analisa torsi dapat menunjukkan seberapa besar nilai daya yang dihasilkan. Dimana torsi pada pendulum akan menimbulkan momen sehingga dapat memutar poros yang diteruskan untuk memutar generator. Dimana gaya-gaya pada pendulum dapat dihitung dengan cara :

a. Wave Force

Untuk mengetahui gaya ombak atau wave force (F_w) yang terdapat pada gelombang, maka pertama harus mengetahui energi gelombang yang tersedia. Energi gelombang total adalah jumlah dari energi kinetik dan energi potensial.

$$P_{\text{wave}} = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T}{32\pi} \quad (1)$$

$$F_{\text{wave}} = \frac{P_{\text{wave}} \times T}{\lambda} \quad (2)$$

Dimana P_{wave} adalah daya gelombang (watt), ρ adalah Massa jenis air tawar (1000 kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$), H adalah Tinggi gelombang (m), T adalah Periode gelombang (s), λ adalah Panjang gelombang (m).

b. Bouyancy Force

Gaya apung atau bouyancy force (F_b), yaitu gaya tekan keatas pada suatu benda yang mengapung sama dengan berat air yang dipindahkan (Archimedes Principle). Gaya buoyancy selalu sama dengan berat fluida yang dipindahkan^[3].

$$F_b = \rho_{\text{fluida}} \cdot V_{\text{fluida}} \cdot g$$

$$V_{\text{fluida}} = \frac{\rho_{\text{Benda}} \cdot V_{\text{Benda}}}{\rho_{\text{fluida}}} \quad (3)$$

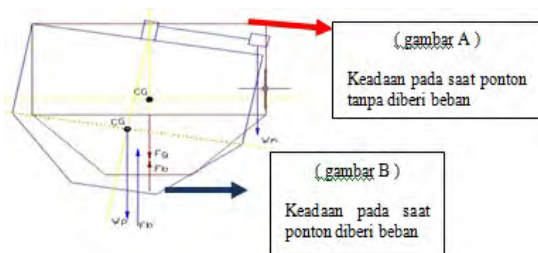
c. Generated Force

Gaya yang dihasilkan atau generated force ($F_{\text{generated}}$) merupakan resultan gaya yang dihasilkan untuk dapat menggerakkan ponton dan pergerakan mengakibatkan pendulum berputar setelah itu diteruskan memutar generator.

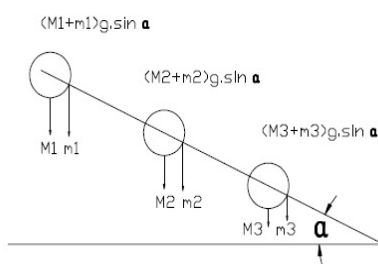
$$F_{\text{generated}} = (F_{\text{wave}} + F_{\text{bouyancy}}) - F_{\text{grafitasi}} \quad (4)$$

d. Analisa gaya pada ponton

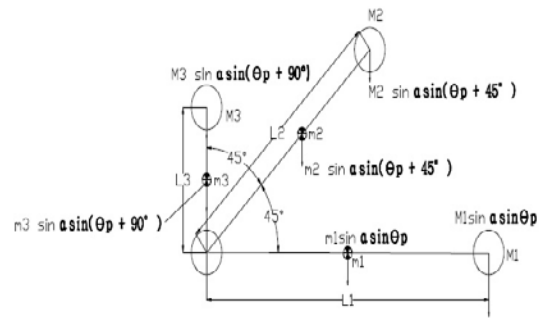
Pada gambar 4, 5 dan gambar 6 merupakan gaya-gaya yang terjadi pada model mekanisme PLTGL Sistem Pontoon Dengan Tiga Bandul. Berikut penjabarannya:



Gambar.4. gaya-gaya yang bekerja pada ponton (a) pada saat ponton tanpa beban, (b) pada saat ponton diberi beban bandul.



Gambar .5. Free Body Diagram Bandul Pandangan Samping



Gambar .6. Free Body Diagram Bandul Pandangan Atas

Melalui gambar 4,5 dan 6 dapat diperoleh persamaan kesetimbangan gaya dan momen dinamis yaitu, sebagai berikut.

$$J_{p1} = M_1 l_1^2 + \frac{m_1 \cdot l_1^2}{3} v \quad (5)$$

$$J_{p2} = M_2 l_2^2 + \frac{m_2 \cdot l_2^2}{3} \quad (6)$$

$$J_{p3} = M_3 l_3^2 + \frac{m_3 \cdot l_3^2}{3} \quad (7)$$

Perhitungan mengenai persamaan gerak pendulum berlaku persamaan gerak rotasi mengelilingi sumbu tetap sebagai berikut.

$$\Sigma M = \Sigma J_p \ddot{\theta}_p$$

$$(M_1 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin \theta_p \cdot L_1 + m_1 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin \theta_p \cdot \frac{L_1}{2}) + (M_2 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot L_2 + m_2 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot L_2) + (M_3 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin(\theta_p + 90^\circ) \cdot L_3 + m_3 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin(\theta_p + 90^\circ) \cdot L_3) = \Sigma J_p \ddot{\theta}_p$$

Karena,

$$M_1 \neq M_2 \neq M_3$$

$$m_1 \neq m_2 \neq m_3, \text{ maka :}$$

$$(M_1 \cdot \sin \theta_p \cdot L_1 + M_2 \cdot \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot L_2 + M_3 \cdot \sin(\theta_p + 90^\circ) \cdot L_3) \cdot g \cdot \sin \alpha + m_1 \cdot \sin \theta_p \cdot L_1 + m_2 \cdot \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot L_2 + m_3 \cdot \sin(\theta_p + 90^\circ) \cdot L_3 \cdot g \cdot \sin \alpha = \Sigma J_p \ddot{\theta}_p \quad (8)$$

$$(M_1 \cdot \sin \theta_p \cdot L_1 + M_2 \cdot \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot L_2) + M_3 \cdot \sin(\theta_p + 90^\circ) \cdot L_3 \cdot g \cdot \sin \alpha + m_1 \cdot \sin \theta_p \cdot L_1 + m_2 \cdot \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot L_2 + m_3 \cdot \sin(\theta_p + 90^\circ) \cdot L_3 \cdot g \cdot \sin \alpha = M_1 l_1^2 + m_1 \cdot l_1^2 \ddot{\theta}_p + (M_2 l_2^2 + m_2 \cdot l_2^2) \ddot{\theta}_p + (M_3 l_3^2 + m_3 \cdot l_3^2) \ddot{\theta}_p \quad (9)$$

$$((M_1 + \frac{1}{2} m_1) L_1 \cdot \sin \theta_p + (M_2 + \frac{1}{2} m_2) L_2 \cdot \sin(\theta_p + 45^\circ) + (M_3 + \frac{1}{2} m_3) L_3 \cdot \sin(\theta_p + 90^\circ)) \cdot g \cdot \sin \alpha = (M_1 l_1^2 + m_1 \cdot l_1^2 + M_2 l_2^2 + m_2 \cdot l_2^2 + M_3 l_3^2 + m_3 \cdot l_3^2) \ddot{\theta}_p \quad (10)$$

$$(M_1 l_1^2 + M_2 l_2^2 + M_3 l_3^2 + \frac{1}{3} (m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2) \ddot{\theta}_p - ((M_1 + 12 m_1) L_1 \cdot \sin \theta_p + (M_2 + 12 m_2) L_2 \cdot \sin(\theta_p + 45^\circ) + (M_3 + 12 m_3) L_3 \cdot \sin(\theta_p + 90^\circ)) \cdot g \cdot \sin \alpha = 0 \quad (11)$$

Karena,

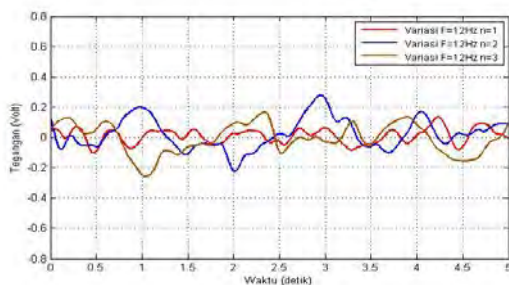
$$\begin{aligned}\sin(\theta_p + 45^\circ) &= \sin \theta_p \cos 45^\circ + \cos \theta_p \sin 45^\circ \\ &= \frac{1}{2}\sqrt{2} \sin \theta_p + \frac{1}{2}\sqrt{2} \cos \theta_p \\ &= \frac{1}{2}\sqrt{2} (\sin \theta_p + \cos \theta_p) \\ \sin(\theta_p + 90^\circ) &= \sin \theta_p \cos 90^\circ + \cos \theta_p \sin 90^\circ \\ &= 0 + \cos \theta_p \\ &= \cos \theta_p \text{ maka,}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}& (M_1 l_1^2 + M_2 l_2^2 + M_3 l_3^2 + \frac{1}{3}(m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + \\ & m_3 l_3^2) 2\ddot{\theta} - ((M_1 + 12m_1)L_1 \sin \theta_p + (M_2 + 12m_2)L_2 \sin \theta_p)g \\ & (\sin \theta_p + \cos \theta_p) + (M_3 + \frac{1}{2}m_3)L_3 \cos \theta_p)g \cdot \sin \alpha = 0\end{aligned}\quad (12)$$

$\omega n =$

$$\sqrt{\frac{((M_1 + \frac{1}{2}m_1)L_1 \sin \theta_p + (M_2 + \frac{1}{2}m_2)L_2 \frac{1}{2}\sqrt{2}(\sin \theta_p + \cos \theta_p) + (M_3 + \frac{1}{2}m_3)L_3 \cos \theta_p)g}{(M_1 l_1^2 + M_2 l_2^2 + M_3 l_3^2 + \frac{1}{3}(m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2))}} \quad (13)$$

B. Pengaruh variasi jumlah lengan pada



Gambar 7. Grafik Variasi Jumlah Lengan

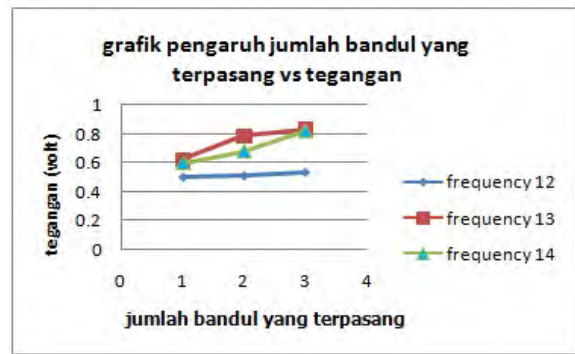
Pada gambar 7 adalah contoh hasil grafik Grafik yang menunjukkan bahwa voltase terbesar yang ditunjukkan oleh amplitudo (A) sebesar 0.536 Volt terdapat pada pemasangan 3 bandul dengan panjang lengan 22 mm, 19 mm, 16 mm, kemudian pemasangan 2 bandul dengan panjang lengan 22 mm dan 19 mm dengan amplitudo (A) sebesar 0.513 Volt dan penyimpangan terkecil pada pemasangan 1 bandul dengan panjang lengan 22 mm sebesar 0.504 Volt. Hasil V_{rms} yang dihasilkan diolah melalui *software*.

Nilai tegangan eksperimen dari variasi pemasangan jumlah bandul ditampilkan dalam bentuk table 2 dan gambar 8 berikut ini

Table 2.

Data Eksperimen Variasi Jumlah Bandul Yang Terpasang

Pengaruh Variasi Jumlah Bandul Yang Terpasang			
Variasi			Kesimpulan
Frekuensi (Hz)	Jumlah bandul terpasang (n)	V_{rms} (volt)	
12	1	0.504	Jumlah bandul bertambah voltase naik 5,97%
	2	0.513	
	3	0.536	
13	1	0.622	Jumlah bandul bertambah voltase naik 25,06%
	2	0.78	
	3	0.83	
14	1	0.598	Jumlah bandul bertambah voltase naik 27,07%
	2	0.67	
	3	0.82	



Gambar 8. Grafik Pengaruh Variasi jumlah bandul yang terpasang vs tegangan

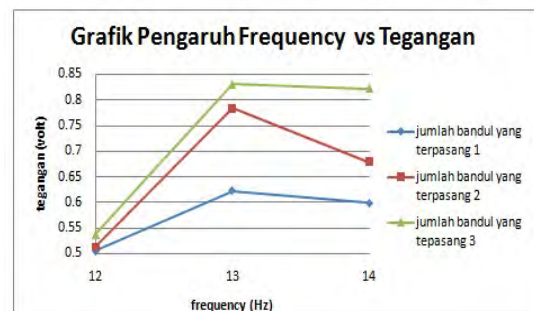
pada gambar 8 adalah grafik perbandingan antara jumlah bandul yang terpasang vs tegangan. Grafik pengaruh variasi jumlah bandul yang terpasang dibuat untuk mengetahui pengaruh jumlah bandul yang terpasang terhadap tegangan yang dihasilkan pada frekuensi yang sama. Berdasarkan gambar 4.7 dapat diambil kesimpulan bahwa jumlah bandul yang terpasang mempengaruhi tegangan yang dihasilkan, yaitu semakin banyak bandul yang terpasang pada mekanisme PLTGL – Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul semakin besar tegangan yang dihasilkan. Dimana dengan memasang bandul dengan jumlah yang lebih banyak dapat meningkatkan nilai tegangan maksimum hingga 27,07% nilai tegangan. Dimana kenaikan rata-rata untuk pengaruh panjang lengan adalah 10,52%.

C. Pengaruh variasi frekuensi terhadap tegangan

Table 3.

Data Eksperimen Variasi Jumlah Bandul Yang Terpasang

Pengaruh Frekuensi			
Variasi			Kesimpulan
Jumlah Bandul yang terpasang (n)	Frekuensi (Hz)	rms (volt)	
1	12	0.504	Frekuensi naik voltase naik 15,7%
	13	0.622	
	14	0.598	
2	12	0.513	Frekuensi naik voltase naik 23,43%
	13	0.78	
	14	0.67	
3	12	0.536	Frekuensi naik voltase naik 34,63%
	13	0.83	
	14	0.82	



Gambar 9. Grafik Pengaruh Variasi frekuensi vs tegangan

Grafik pada gambar 9 adalah grafik Pengaruh *frequency* vs tegangan. Grafik pengaruh variasi *frequency* dibuat untuk mengetahui pengaruh variasi *frequency*

terhadap tegangan yang dihasilkan pada jumlah bandul yang terpasang. Berdasarkan gambar 9 dapat diambil kesimpulan bahwa variasi *frequency* mempengaruhi tegangan yang dihasilkan, yaitu semakin tinggi *frequency* pada mekanisme PLTGL – Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul semakin besar tegangan yang dihasilkan. Namun pada *frequency* 14 Hz tegangan yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan pada saat *frequency* 13 Hz hal ini dikarenakan inverter yang digunakan kurang baik sehingga pada saat pengujian ombak yang dihasilkan pada *frequency* 13 Hz lebih besar. Adapun kenaikan rata-rata untuk pengaruh variasi *frequency* adalah 9,645%.

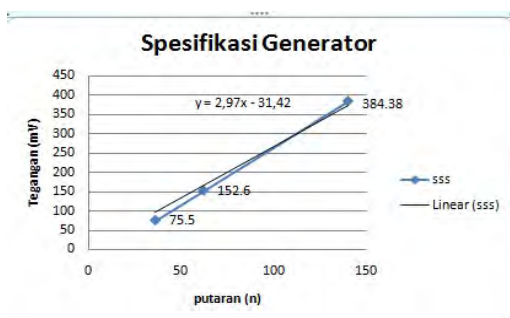
Dari kedua variasi tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa variasi penambahan jumlah bandul memberikan efek paling dominan terhadap peningkatan tegangan, yaitu dapat meningkatkan tegangan maksimum sebesar 10,52% dari kondisi awalnya. Variasi Frekuensi memberikan efek 9,645% terhadap peningkatan tegangan.

D. Analisa pengaruh variasi terhadap putaran

Tabel .4.

Spesifikasi kecepatan Putaran Generator

No	Putaran (rpm)	Tegangan (mV)
1	36	75,5
2	62	152,6
3	140	384,38



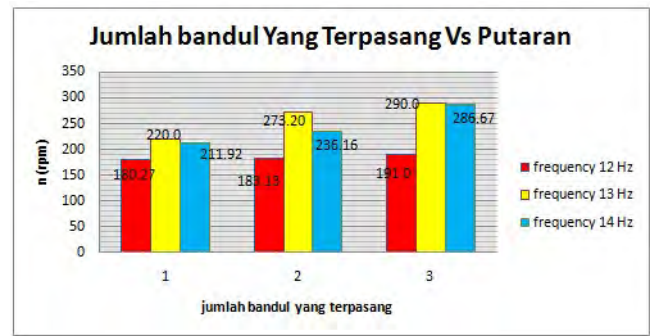
Gambar .10. Grafik Spesifikasi Generator

Cara mencari variasi yang memiliki efek paling dominan adalah membandingkan besar putaran pada variasi yang dilakukan. Untuk mengetahui pengaruh variasi frekuensi terhadap kecepatan putaran maka dilakukan perhitungan pada jumlah bandul yang terpasang di frekuensi yang berbeda. Untuk mengetahui pengaruh jumlah bandul yang terpasang, maka variabel yang dihitung adalah perubahan tegangan disetiap pertambahan jumlah bandul yang terpasang pada frekuensi yang sama. Untuk perhitungan kecepatan putaran (n) menggunakan persamaan $y=2,97x-31,42$ persamaan tersebut didapatkan dari spesifikasi generator AC yang digunakan sehingga didapatkan persamaan untuk mencari kecepatan putaran yaitu $n = \frac{V_{rms} + 31,42}{2,97}$.

Tabel .5.

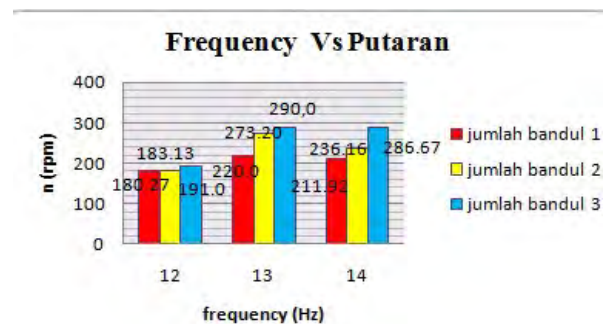
Data Eksperimen Pengaruh Variasi Jumlah Bandul Yang Terpasang

Jumlah Bandul yang terpasang (n)	F(Hz)	v _{rms} (V)	V _{rms} (mV)	putaran (Rpm)
1	12	0,504	504	180,27
	13	0,622	622	220
	14	0,598	598	211,92
2	12	0,513	513	183,3
	13	0,78	780	273,2
	14	0,67	670	236,16
3	12	0,536	536	191
	13	0,83	830	290
	14	0,82	820	286,67



Gambar .11. Grafik Jumlah Bandul Vs Putaran

Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 11 adalah hasil eksperimen yang dilakukan pada frekuensi gelombang yang sama yaitu dengan jumlah bandul yang terpasang berbeda. Frekuensi 12 Hz (grafik warna merah), jumlah bandul yang terpasang 1 menghasilkan kecepatan putaran (n) terbesar yaitu 180,27 rpm kemudian jumlah bandul yang terpasang 2 menghasilkan $n = 183,13$ rpm dan terakhir jumlah bandul yang terpasang 3 dengan $n = 191$ rpm. Frekuensi 13 Hz (grafik warna kuning), jumlah bandul yang terpasang 1 menghasilkan kecepatan putaran (n) terbesar yaitu 220 rpm kemudian jumlah bandul yang terpasang 2 menghasilkan $n = 273,2$ rpm dan terakhir jumlah bandul yang terpasang 3 dengan $n = 290$ rpm. Frekuensi 14 Hz (grafik warna biru), jumlah bandul yang terpasang 1 menghasilkan kecepatan putaran (n) terbesar yaitu 211,92 rpm kemudian jumlah bandul yang terpasang 2 menghasilkan $n = 273,2$ rpm dan terakhir jumlah bandul yang terpasang 3 dengan $n = 286,67$ rpm.



Gambar .12. Grafik Jumlah Frekuensi Vs Putaran

Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 adalah hasil eksperimen yang dilakukan pada jumlah pemasangan bandul yang sama pada frekuensi gelombang berbeda. Jumlah bandul yang terpasang 1 (grafik warna merah), frekuensi 13 Hz menghasilkan kecepatan putaran (n) terbesar yaitu 220 rpm, kemudian frekuensi 14 Hz menghasilkan $n = 211,92$ rpm dan terakhir frekuensi 12 Hz dengan $n = 180,27$ rpm. Jumlah bandul yang terpasang 2 (grafik warna kuning), kecepatan putaran (n) terbesar terjadi pada frekuensi 13 Hz yaitu $n = 273,2$ rpm, kemudian frekuensi 14 Hz menghasilkan $n = 236,16$ rpm dan frekuensi 12 Hz menghasilkan $n = 183,13$ rpm. Panjang lengan 19 cm (grafik warna merah) pada frekuensi 13 Hz menghasilkan $n = 290$ rpm, kemudian frekuensi 14 Hz dengan $n = 286,67$ rpm dan terakhir frekuensi 12 Hz $n = 191$ rpm.

IV. KESIMPULAN

Dari analisa dan pembahasan pada PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul. Dengan variasi jumlah bandul dan frekuensi gelombang didapat kesimpulan adalah Nilai tegangan akan meningkat seiring bertambahnya jumlah bandul pada mekanisme PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul. Nilai tegangan terbesar untuk variasi jumlah bandul 3 ($N=3$) pada frekuensi 13 Hz yaitu sebesar 0,83 volt dan tegangan terkecil pada jumlah bandul 1 ($N=1$) pada frekuensi 12 Hz yaitu 0,504. Nilai putaran terbesar untuk variasi jumlah bandul 3 ($N=3$) pada frekuensi 13 Hz yaitu sebesar 290 Rpm dan terkecil terkecil pada jumlah bandul 1 ($N=1$) pada frekuensi 12 Hz yaitu 180,27 Rpm. Variasi jumlah bandul memiliki efek dominan dalam peningkatan tegangan. Dimana setiap penambahan mekanisme memberikan tambahan tegangan rata-rata sebesar 10,52 %. Variasi *frequency* memiliki efek lebih kecil dari variasi jumlah bandul yang terpasang dalam peningkatan tegangan. Dimana setiap penambahan mekanisme memberikan tambahan tegangan rata-rata sebesar 9,645%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada seluruh pihak yang telah banyak membantu atas selesainya artikel ini, terutama kepada Ir. Yunarko Triwinarno, MT. dan Dr. Eng. Harus Laksana Guntur S.T, M. Eng selaku dosen pembimbing, kedua orang tua dan keluarga besar, ketua jurusan, karyawan, dosen Teknik Mesin ITS, serta teman-teman terbaik kampus perjuangan Teknik Mesin ITS Surabaya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Balitbang Ketenaga Listrik PLN dan LPPM ITS, 2010. *Studi Pemodelan Dan Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandul (PLTGL – SB)*. Surabaya.
- [2] Mork, G., Barstow, S., Pontes, M.T. and Kabuth, A., 2010. "Assessing the global wave energy potential". *Proceedings of OMAE 2010 (ASME), 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Shanghai, China, 6 - 10 Juni.
- [3] Anonim. 2010. "World Energy Council". *International Ocean Energy Workshop*. Grand Palace Hotel, Surabaya, 17 Desember
- [4] Putu Risti Nurmallasari. 2014. *Studi Eksperiment Dan Analisa Energi Listrik Yang Dihasilkan Mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Dengan Metode Ponton Singel Bandul*. Institut teknologi sepuluh november. Surabaya.
- [5] Prof. Dr. Mukhtasor. 2013. "Ocean Energy Policy and Development in Indonesia". *International Ocean Energy Workshop*. Grand Palace Hotel, Surabaya, 17 Desember.
- [6] Lev A. Ostrovsky, Alexander I. Potapov, 2002. *Modulated Waves: Theory and Application*, Europe: Johns Hopkins University Press.

- [7] Intelligent Energy Europe. *Ocean Energy: State of The Art*. Europe.



RANCANG BANGUN DAN STUDI EKSPERIMEN RESPON DINAMIS MODEL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT SISTEM TIGA BANDUL

**Disusun Oleh :
IBRAHIM AZ
NRP. 2112.105.012**

Dosen Pembimbing:
Ir. Yunarko Triwinarno, MT.
Co.Pembimbing
Dr.Eng.Harus Laksana Guntur,S.T,M.Eng





LATAR BELAKANG





LATAR BELAKANG



Memiliki Garis Pantai Terpanjang Keempat Dunia

Potensi Energi Laut Sebesar 6.000 MW (Prof. Dr. Mukhtasor , 2011).



RUMUSAN MASALAH



1. Bagaimana merancang bangun model ponton pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem tiga bandul ?
2. Bagaimana menguji karakteristik respon dinamis model pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem tiga bandul ?



BATASAN MASALAH

1. Mekanisme PLTGL yang akan dibuat hanya digunakan untuk skala laboratorium.
2. Gesekan-gesekan yang terjadi pada poros dan mekanisme tidak diperhitungkan.
3. Gelombang air yang digunakan hasil simulasi mekanisme pembuat gelombang yang dapat divariasikan frekuensi dan amplitudonya.
4. Gelombang air yang terjadi hanya ke arah horisontal (merambat).
5. Gerakan pelampung dianggap satu derajat kebebasan (vertikal).



TUJUAN PENELITIAN



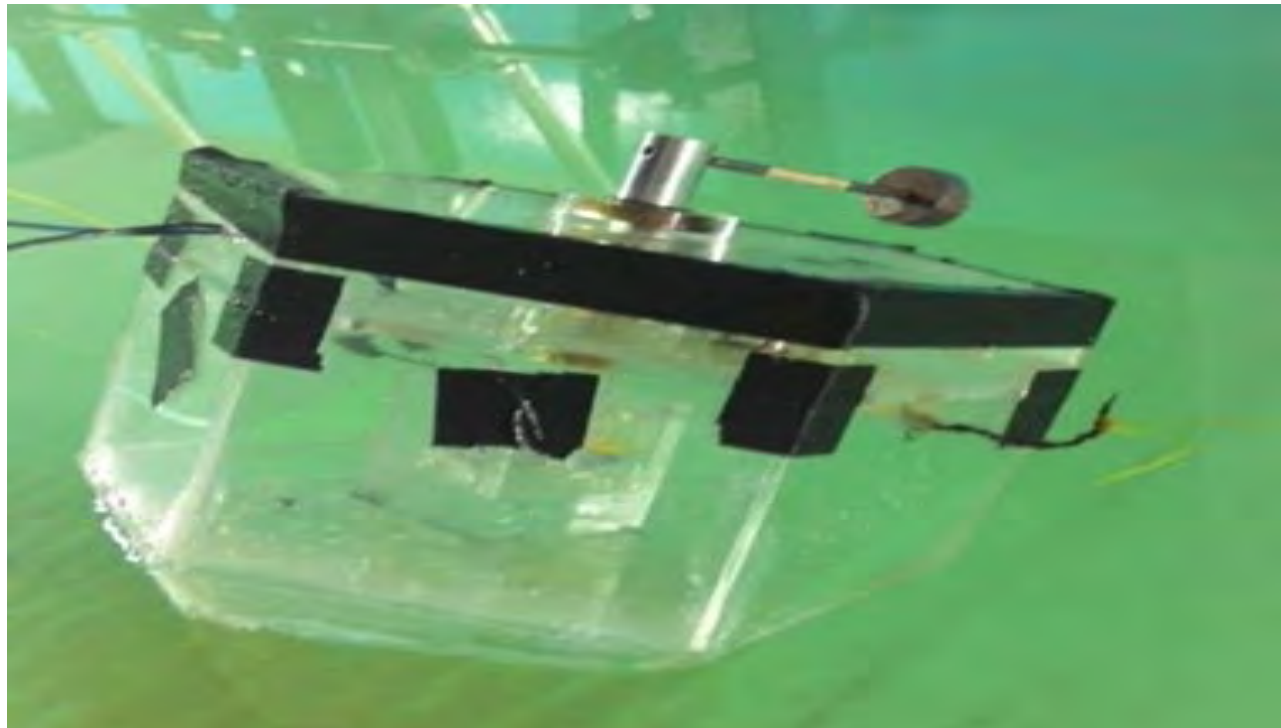
1. merancang bangun model ponton pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem tiga bandul
2. menguji karakteristik respon dinamis model pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem tiga bandul



PENELITIAN TERDAHULU



PLTGL Single Pendulum oleh Putu Risti
Nirmalasari





PENELITIAN TERDAHULU



Data Hasil percobaan PLTGL-SSP Putu Risti
Nirmalasari

Panjang Lengan (cm)	Massa Pendulum (gram)	Vrms (Volt)
6	50	0.0677
	80	0.0764
	100	0.0824
8	50	0.0683
	80	0.0713
	100	0.0806
10	50	0.0696
	80	0.0710
	100	0.0752



PENELITIAN TERDAHULU



PLTGL-Sistem Ponton Single Pendulum oleh
Zamrisyaf



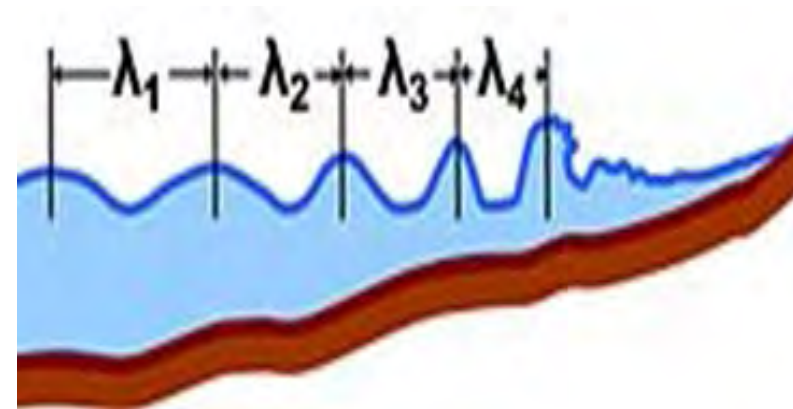
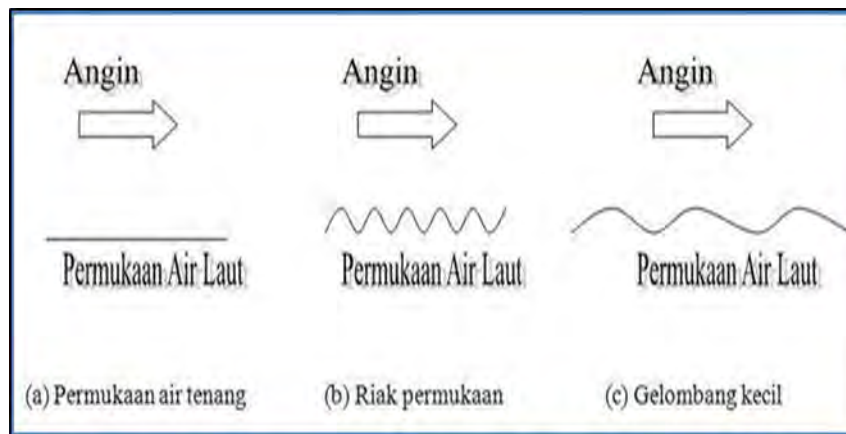
Dengan panjang lengan 2 meter dan berat bandul 10 kg, PLTGL Zamrisyaf ini dapat membangkitkan 20 MW



DASAR TEORI



Gelombang Air Laut



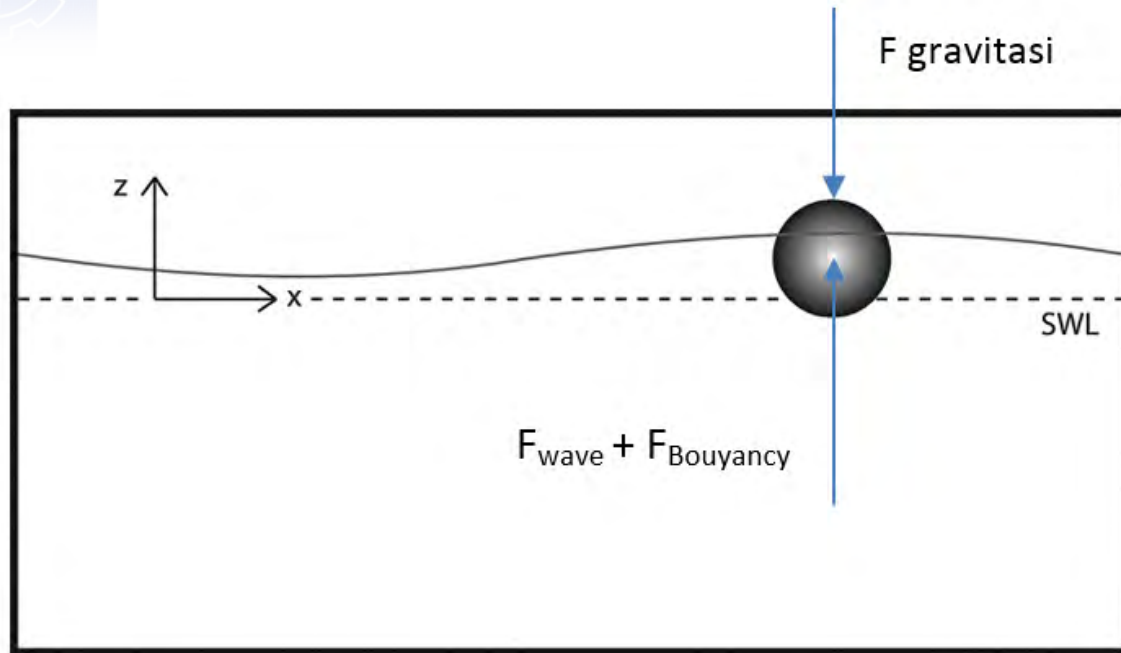
Pergerakan naik dan turunnya air dengan arah tegak lurus pada permukaan air laut yang membentuk kurva ataupun grafik sinusoidal



DASAR TEORI



Analisa Gaya Pada Pelampung



$$F_{\text{generated}} = \sum F = (F_{\text{wave}} + F_{\text{bouyancy}}) - F_{\text{gravitasi}}$$

$$F_{\text{wave}} = \frac{P_{\text{wave}} \cdot T}{\lambda}$$

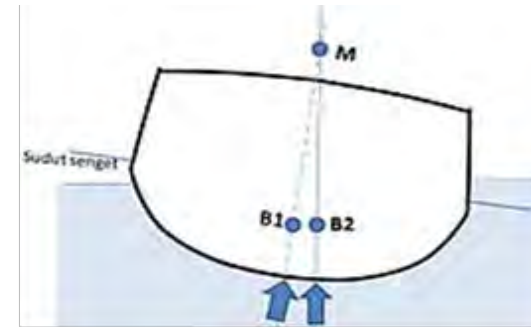
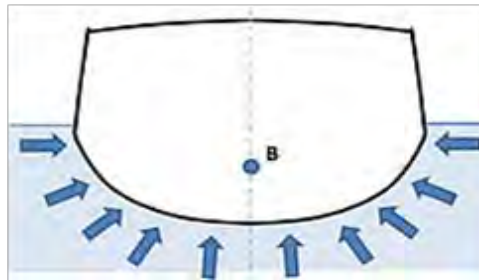
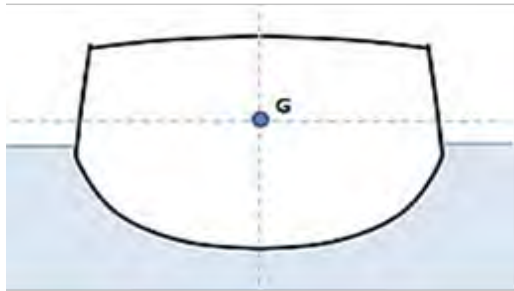
$$F_{\text{bouyancy}} = \rho_{\text{fluida}} \cdot g \cdot V_{\text{benda tercelup}}$$



DASAR TEORI



Analisa Pada Ponton



$$F_{\text{generated}} = (F_{\text{wave}} + F_{\text{bouyancy}}) - F_{\text{gravitasi}}$$
$$= \left[\left(\frac{P_{\text{wave}}}{c} \right) + (\rho \cdot g \cdot V_{\text{tercelup}}) \right] - (m \cdot g)$$

$$P_{\text{wave}} = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T}{32\pi}$$

$$F_b = \rho_{\text{fluida}} \cdot V_{\text{fluida}} \cdot g$$

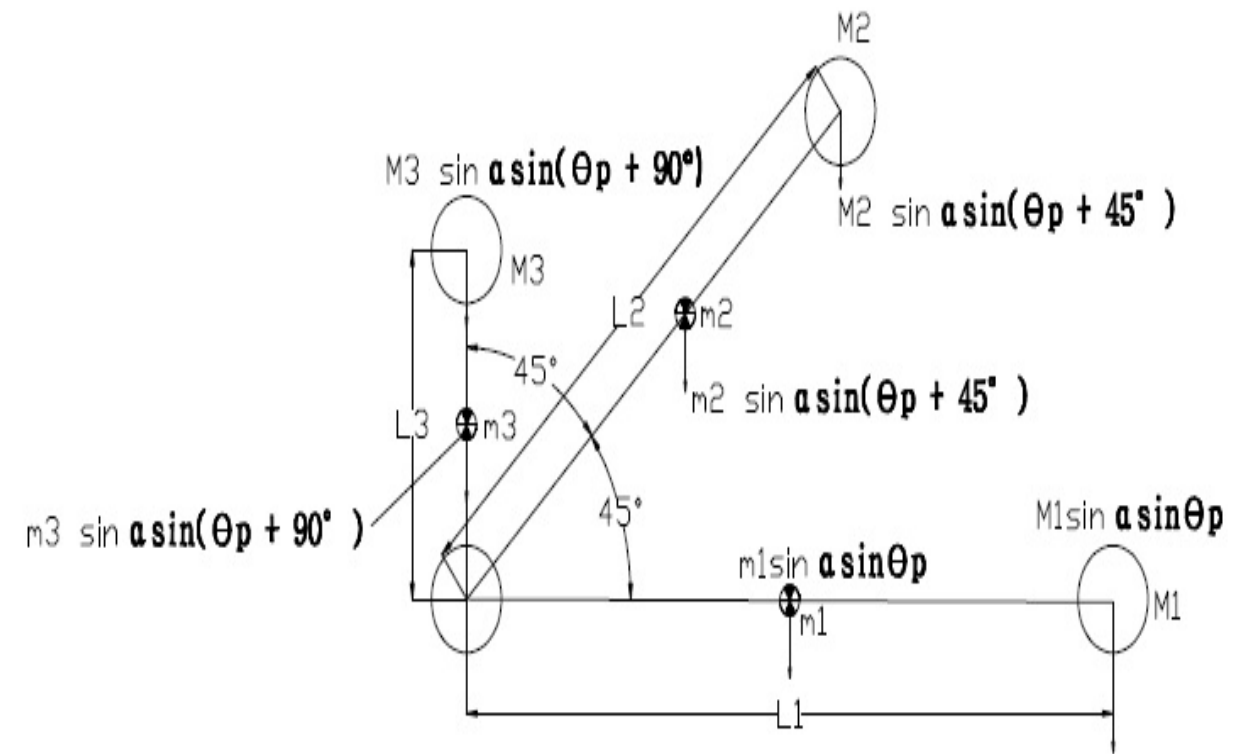
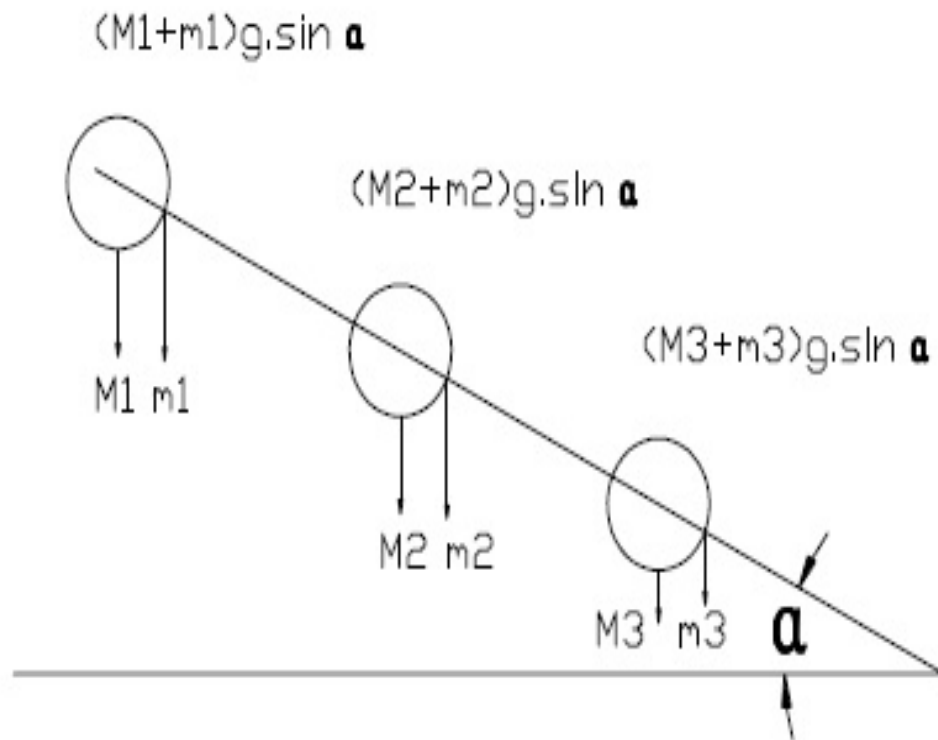
$$F_{\text{gravitasi}} = m \cdot g$$



DASAR TEORI



Analisa Pendulum





DASAR TEORI



Analisa Pendulum

$$J_{p1} = M_1 l_1^2 + \frac{m_1 \cdot l_1^2}{3}$$

$$J_{p2} = M_2 l_2^2 + \frac{m_2 \cdot l_2^2}{3}$$

$$J_{p3} = M_3 l_3^2 + \frac{m_3 \cdot l_3^2}{3}$$

- $\Sigma M = \Sigma J_P \ddot{\theta}_p$

$$\begin{aligned} & (M_1 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin \theta_p \cdot L_1 + m_1 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin \theta_p \cdot \frac{L_1}{2}) + (M_2 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot L_2 + \\ & m_2 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot \frac{L_2}{2}) + (M_3 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin(\theta_p + 90^\circ) \cdot L_3 + m_3 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin(\theta_p + \\ & 90^\circ) \cdot \frac{L_3}{2}) = \Sigma J_P \ddot{\theta}_p \end{aligned}$$



DASAR TEORI



Analisa Pendulum

Karena,

$$M_1 \neq M_2 \neq M_3$$

$m_1 \neq m_2 \neq m_3$, maka :

- $$(M_1 \cdot \sin \theta_p \cdot L_1 + M_2 \cdot \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot L_2 + M_3 \cdot \sin(\theta_p + 90^\circ) \cdot L_3)g \cdot \sin \alpha +$$
$$\left(m_1 \cdot \sin \theta_p \cdot \frac{L_1}{2} + m_2 \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot \frac{L_2}{2} + m_3 \sin(\theta_p + 90^\circ) \cdot \frac{L_3}{2} \right) g \cdot \sin \alpha =$$
$$\Sigma J_P \ddot{\theta}_p$$
- $$(M_1 \cdot \sin \theta_p \cdot L_1 + M_2 \cdot \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot L_2) + M_3 \cdot \sin(\theta_p + 90^\circ) \cdot L_3)g \cdot \sin \alpha +$$
$$g \cdot \sin \alpha \left(m_1 \cdot \sin \theta_p \cdot \frac{L_1}{2} + m_2 \cdot \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot \frac{L_2}{2} + m_3 \sin(\theta_p + 90^\circ) \cdot \frac{L_3}{2} \right) =$$
$$\left(M_1 l_1^2 + \frac{m_1 \cdot l_1^2}{3} \right) \ddot{\theta} + \left(M_2 l_2^2 + \frac{m_2 \cdot l_2^2}{3} \right) \ddot{\theta} + \left(M_3 l_3^2 + \frac{m_3 \cdot l_3^2}{3} \right) \ddot{\theta}$$
- $$\left((M_1 + \frac{1}{2} m_1) L_1 \cdot \sin \theta_p + (M_2 + \frac{1}{2} m_2) L_2 \cdot \sin(\theta_p + 45^\circ) + (M_3 + \frac{1}{2} m_3) L_3 \cdot \sin(\theta_p + 90^\circ) \right) g \cdot \sin \alpha = \frac{1}{3} (m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2) \ddot{\theta}$$



DASAR TEORI



Analisa Pendulum

- $$\left(M_1 l_1^2 + M_2 l_2^2 + M_3 l_3^2 + \frac{1}{3} (m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2) \right) \ddot{\theta} - \left((M_1 + \frac{1}{2} m_1) L_1 \cdot \sin \theta_p + (M_2 + \frac{1}{2} m_2) L_2 \cdot \sin (\theta_p + 45^\circ) + (M_3 + \frac{1}{2} m_3) L_3 \cdot \sin (\theta_p + 90^\circ) \right) g \cdot \sin \alpha = 0$$

Karena,

$$\sin(\theta_p + 45^\circ) = \sin \theta_p \cos 45^\circ + \cos \theta_p \sin 45^\circ$$

$$= \frac{1}{2} \sqrt{2} \sin \theta_p + \frac{1}{2} \sqrt{2} \cos \theta_p$$

$$= \frac{1}{2} \sqrt{2} (\sin \theta_p + \cos \theta_p)$$

$$\sin(\theta_p + 90^\circ) = \sin \theta_p \cos 90^\circ + \cos \theta_p \sin 90^\circ$$

$$= 0 + \cos \theta_p = \cos \theta_p \text{ maka :}$$



DASAR TEORI

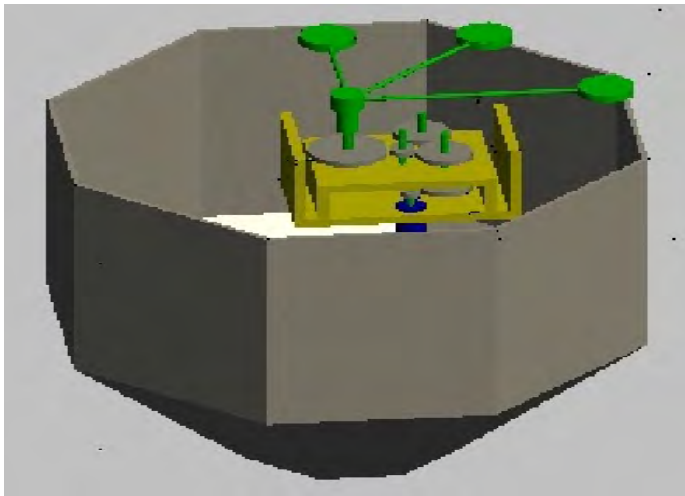
Analisa Pendulum

- $$\left(M_1 l_1^2 + M_2 l_2^2 + M_3 l_3^2 + \frac{1}{3} (m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2) \right) \ddot{\theta} - \left((M_1 + \frac{1}{2} m_1) L_1 \sin \theta_p + (M_2 + \frac{1}{2} m_2) L_2 \cdot \frac{1}{2} \sqrt{2} (\sin \theta_p + \cos \theta_p) + (M_3 + \frac{1}{2} m_3) L_3 \cos \theta_p \right) g \sin \alpha = 0$$

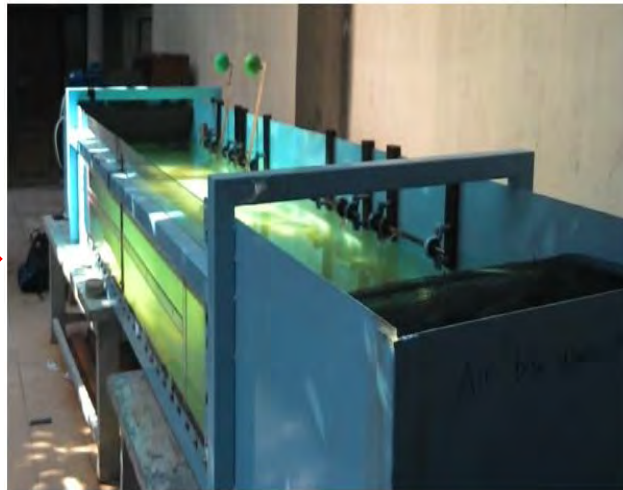
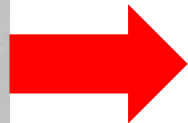
$$\omega_n = \sqrt{\frac{\left((M_1 + \frac{1}{2} m_1) L_1 \sin \theta_p + (M_2 + \frac{1}{2} m_2) L_2 \cdot \frac{1}{2} \sqrt{2} (\sin \theta_p + \cos \theta_p) + (M_3 + \frac{1}{2} m_3) L_3 \cos \theta_p \right) g}{\left(M_1 l_1^2 + M_2 l_2^2 + M_3 l_3^2 + \frac{1}{3} (m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2) \right)}}$$



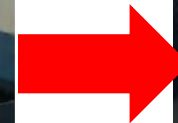
METODOLOGI



Mekanisme PLTGL



Kolam



Oscilloscope



METODOLOGI

Diagram Alir (*Flowchart*) Penyusunan Tugas Akhir

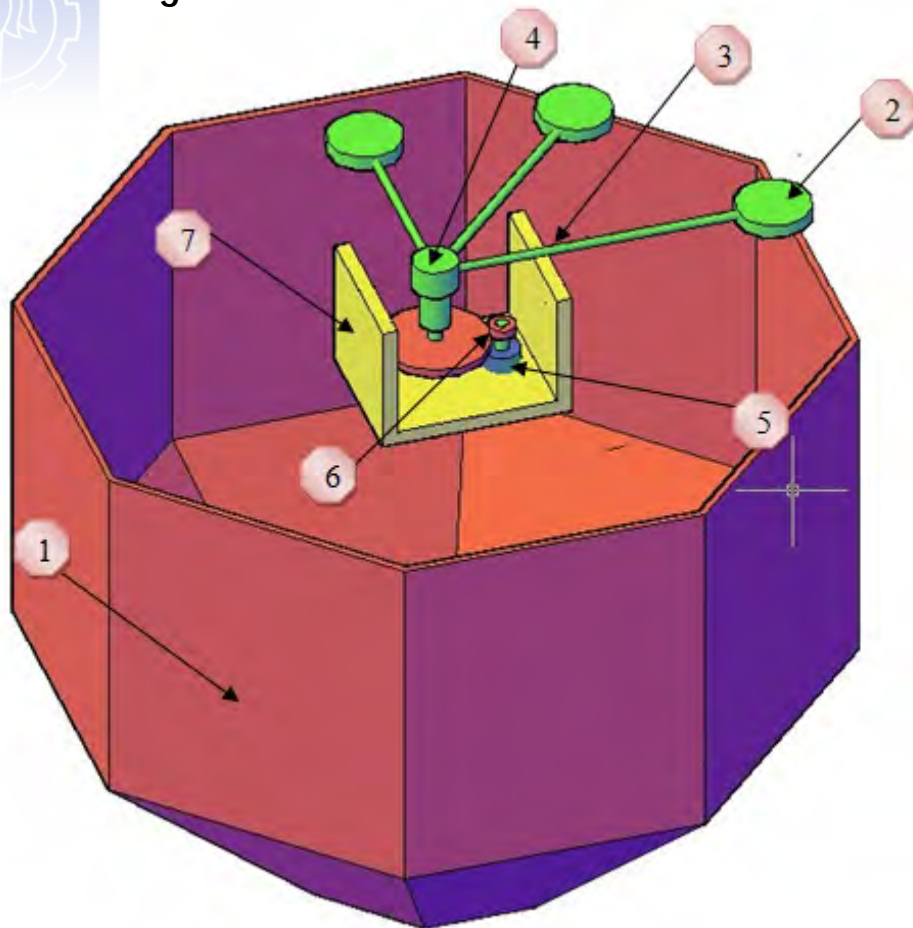




METODOLOGI



Desain Mekanisme PLTGL - Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul

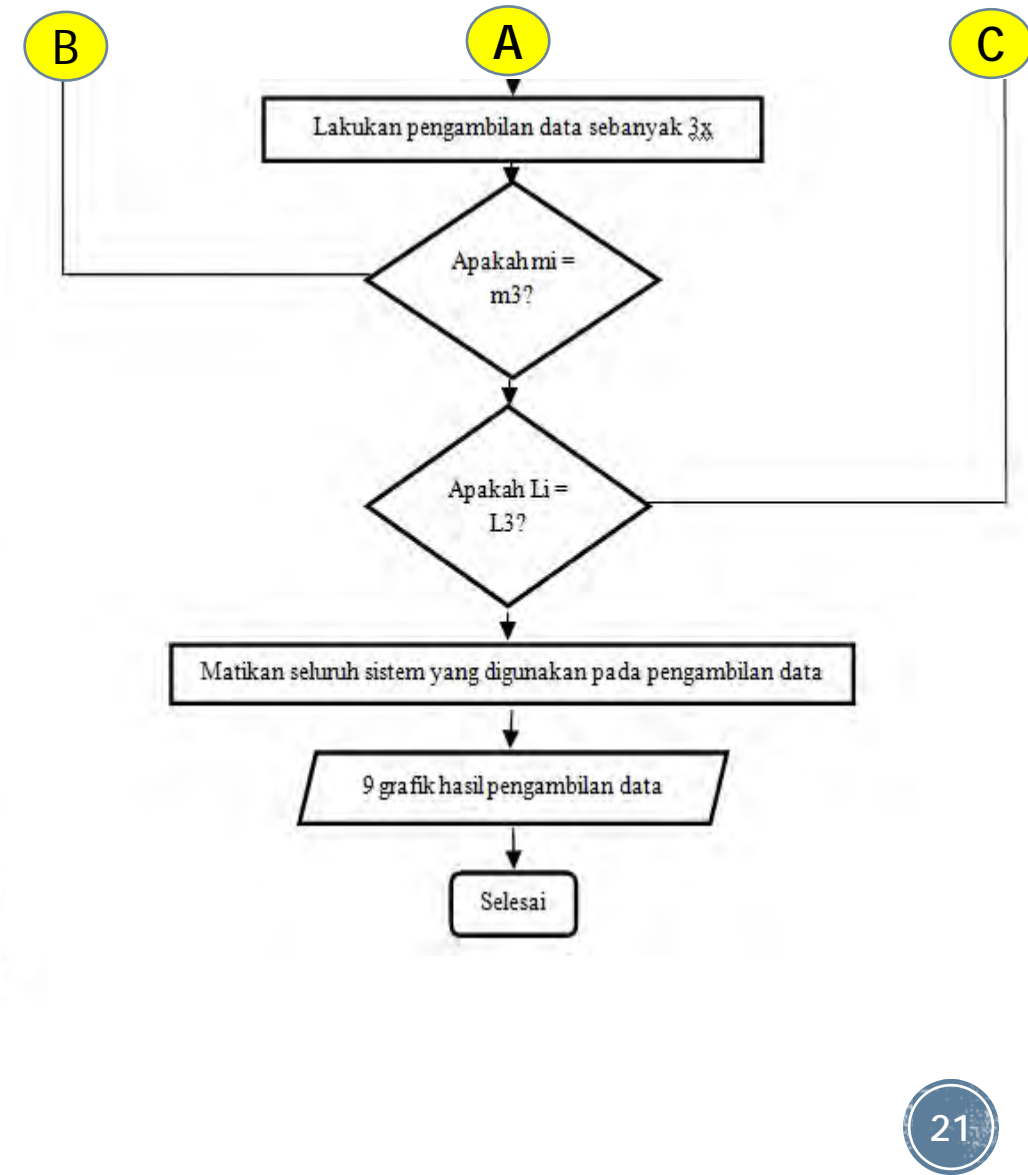
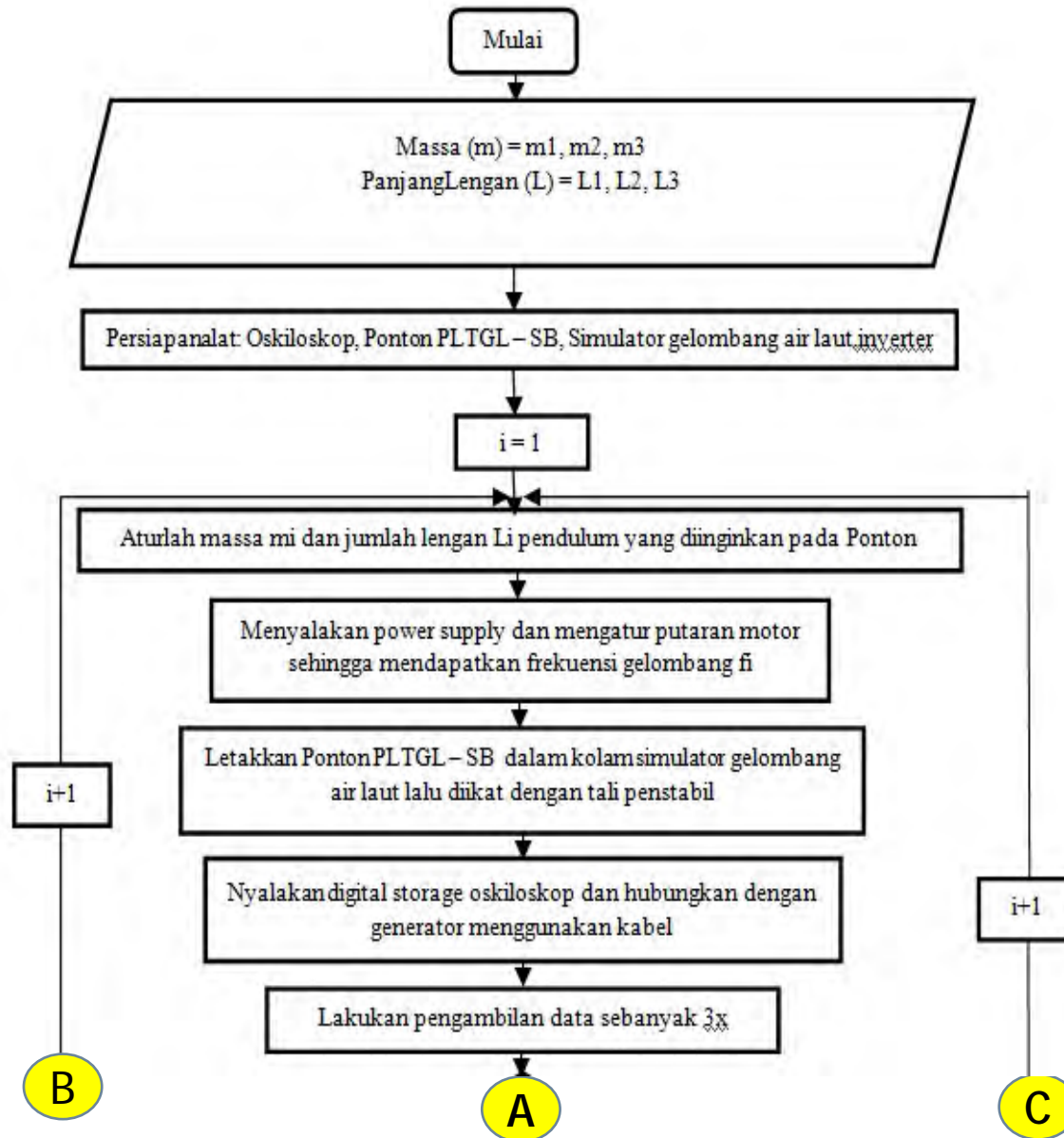


Keterangan Gambar :

1. Ponton
2. Bandul
3. Lengan Bandul
4. Poros Utama
5. Motor AC
6. Gear transmittion
7. Gear Box



METODOLOGI





METODOLOGI



**PANJANG LENGAN YANG
DIVARIASIKAN :**

1. 16 CM
2. 19 CM
3. 22 CM

MASSA YANG DI VARIASIKAN :

1. 66 gr
2. 78,5 gr
3. 92,1 gr



METODLOGI



Percobaan dengan variasi jumlah bandul yang terpasang





Analisa dan Hasil Percobaan



Table Hasil Pengambilan Data

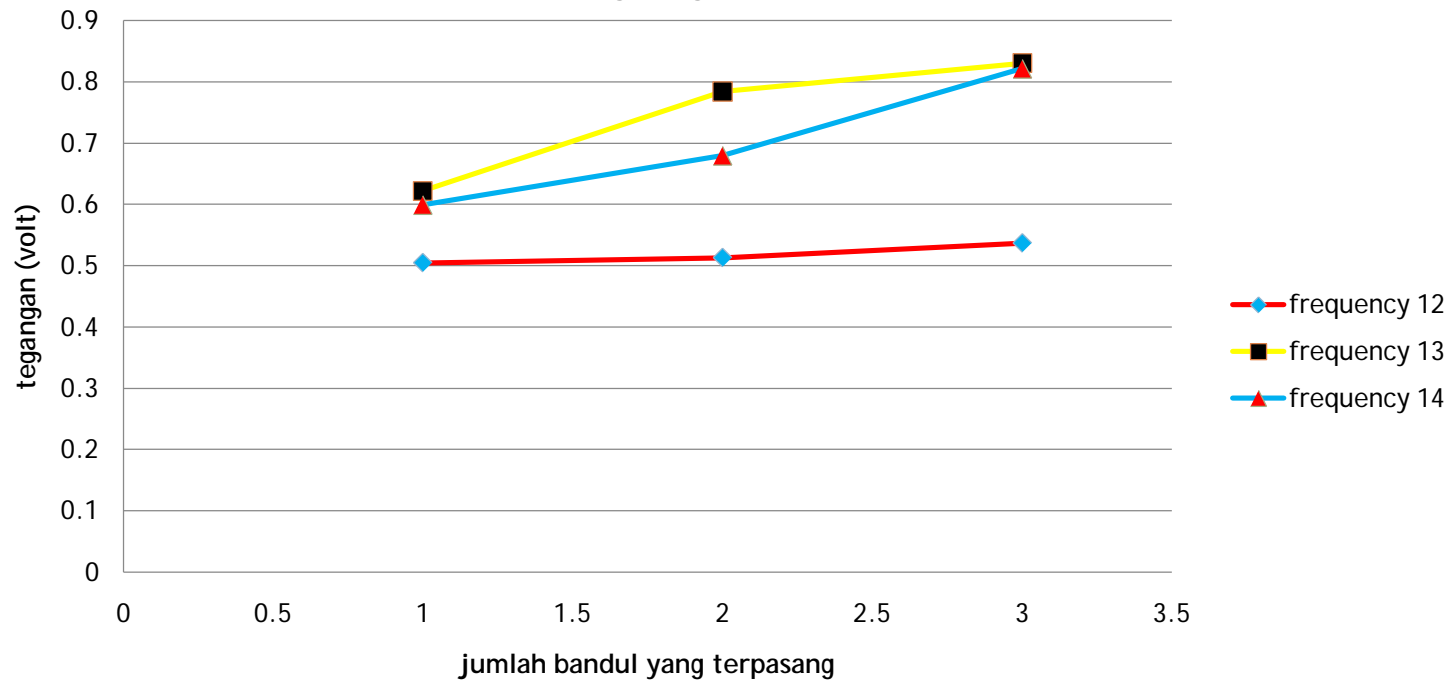
<u>Pengaruh Variasi jumlah bandul yang terpasang</u>		
<u>Frequency (Hz)</u>	<u>Jumlah Bandul Yang Terpasang (n)</u>	<u>Vrms (volt)</u>
12	1	0.504
	2	0,513
	3	0,536
13	1	0,622
	2	0,78
	3	0,83
14	1	0,598
	2	0,67
	3	0,82



Analisa dan Pembahasan

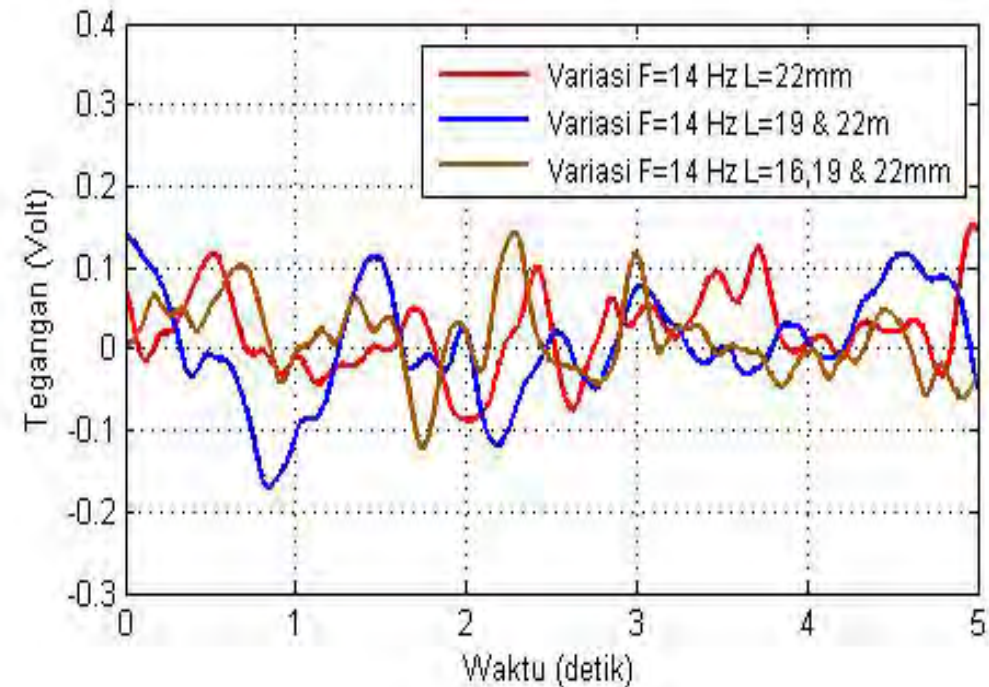
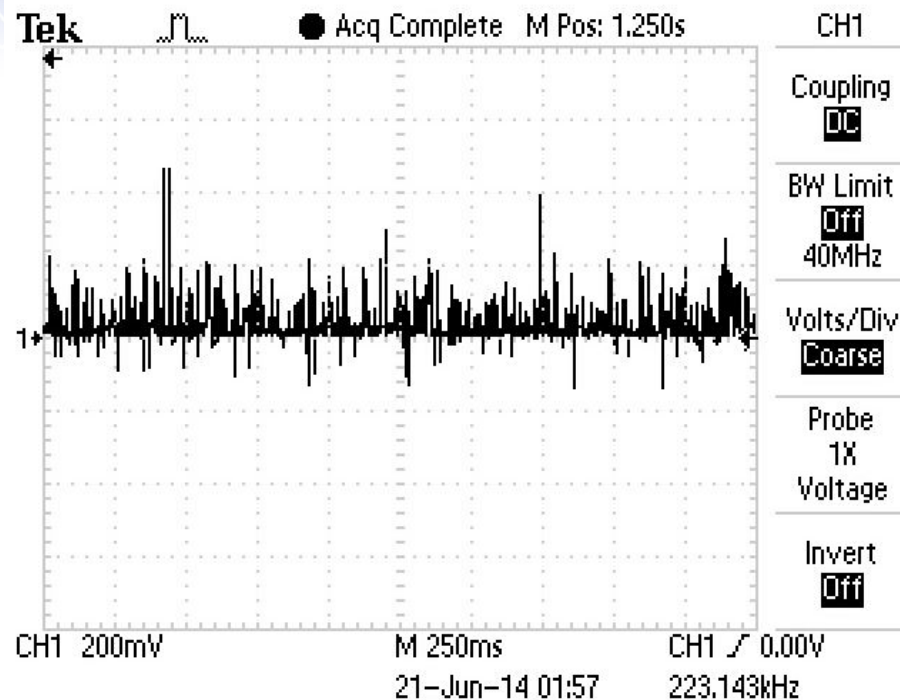


grafik pengaruh jumlah bandul yang terpasang vs tegangan





Analisa dan Pembahasan





Kesimpulan



Dari analisa dan pembahasan pada PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul. Dengan variasi jumlah bandul dan frekuensi gelombang didapat kesimpulan sebagai berikut ;

1. Nilai tegangan akan meningkat seiring bertambahnya jumlah bandul pada mekanisme PLTGL Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul.
2. Nilai tegangan terbesar untuk variasi jumlah bandul 3 ($N=3$) pada frekuensi 13 Hz yaitu sebesar 0,83 volt dan tegangan terkecil pada jumlah bandul 1 ($N=1$) pada frekuensi 12 Hz yaitu 0,504 .
3. Variasi jumlah bandul memiliki efek dominan dalam peningkatan tegangan. Dimana setiap penambahan mekanisme memberikan tambahan tegangan rata-rata sebesar 10,52 %.



Saran



1. Bearing yang digunakan tahan air sehingga mencegah korosi
2. Simulator pembuat gelombang memiliki peredam yang lebih baik, sehingga mencegah gelombang balik sehingga pengamatan dapat dilakukan lebih lama.
3. Dilakukan proses *alignment* antara poros sehingga didapatkan kesatusumbuan poros yang akan meningkatkan efisiensi pada mekanisme PLTGL-Sistem Ponton Dengan Tiga Bandul.



DAFTAR PUSTAKA



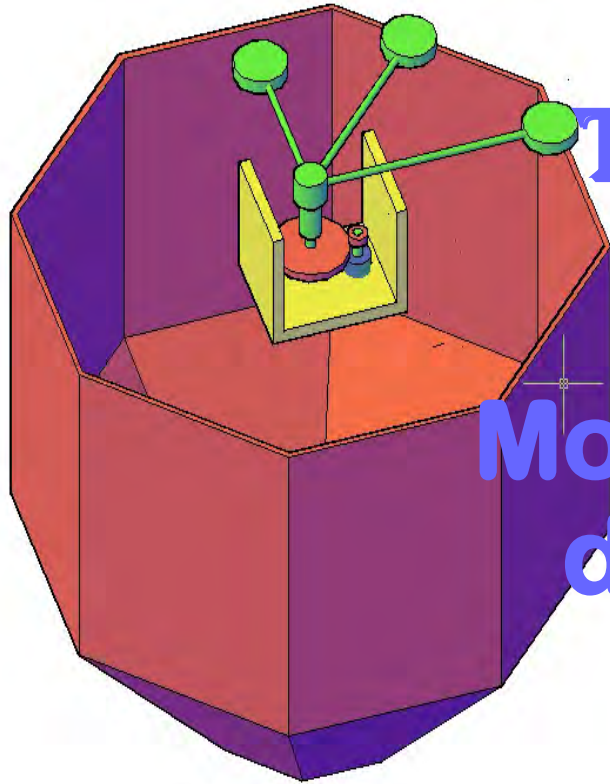
- [1] Balitbang Ketenaga Listrik PLN dan LPPM ITS ., 2010. Studi Pemodelan Dan Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut - Sistem Bandul (PLTGL - SB). Surabaya .
- [2] Mork, G., Barstow, S., Pontes, M.T. and Kabuth, A, 2010. "Assessing the global wave energy potensial". Proceedings of OMAE 2010 (ASME), 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Shanghai, China, 6 - 10 Juni.
- [3] Anonim. 2010. "World Energy Council". International Ocean Energy Workshop. Grand Palace Hotel, Surabaya, 17 Desember
- [4] Putu Risti Nurmalasari. 2014. Studi Eksperiment Dan Analisa Energi Listrik Yang Dihasilkan Mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Dengan Metode Ponton *Singel* Pendulum. Institut teknologi sepuluh november. Surabaya.



DAFTAR PUSTAKA

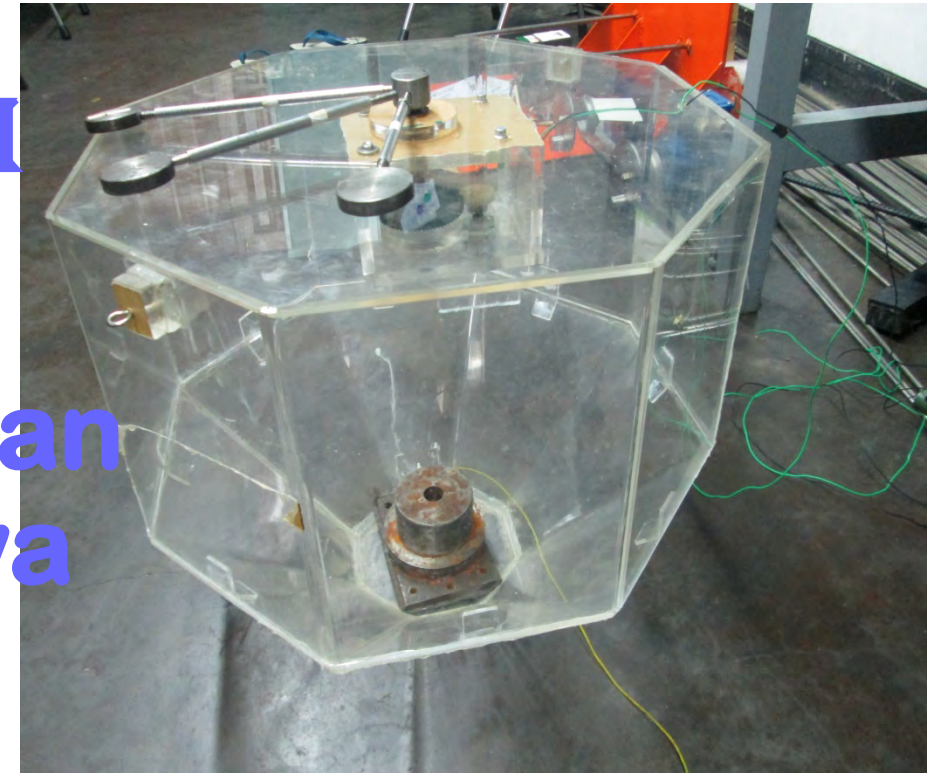


- [5] Prof. Dr. Mukhtasor. 2013. "Ocean Energy Policy and Development in Indonesia". International Ocean Energy Workshop. Grand Palace Hotel, Surabaya, 17 Desember.
- [6] Lev A. Ostrovsky, Alexander I. Potapov, 2002. **Modulated Waves: Theory and Application**, Europe: Johns Hopkins University Press.
- [7] Intelligent Energy Europe. Ocean Energy: State of The Art. Europe.
- [8] Meirovitch, Leonard., (2001). **Fundamental Of Vibration**, McGraw Hill, Singaapore.
- [9] Luluk., (2011). Studi Eksperiment Dan Menganalisa Pengaruh Massa Bandul Terhadap Pola Gerak Bandul Dan Voltage Bangkitan Generator Pada Simulator Pembangkit Tenaga Gelombang Laut - Sistem Bandul Konis Ponton Datar.



SEKIAN
TERIMAKASIH

Mohon masukan
dan sarannya



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Balitbang Ketenaga Listrikan PLN dan LPPM ITS .,2010.*Studi Pemodelan Dan Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandul (PLTGL – SB)*. Surabaya .
- [2] Mork, G., Barstow, S., Pontes, M.T. and Kabuth, A, 2010. “Assessing the global wave energy potensial”. *Proceedings of OMAE 2010 (ASME), 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Shanghai, China, 6 - 10 Juni.
- [3] Anonim. 2010. “World Energy Council”. *International Ocean Energy Workshop*. Grand Palace Hotel, Surabaya, 17 Desember
- [4] Putu Risti Nurmalasari. 2014. *Studi Eksperiment Dan Analisa Energi Listrik Yang Dihasilkan Mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Dengan Metode Ponton Singel Bandul*. Institut teknologi sepuluh november. Surabaya.
- [5] Prof. Dr. Mukhtasor. 2013.“Ocean Energy Policy and Development in Indonesia”. *International Ocean Energy Workshop*. Grand Palace Hotel, Surabaya, 17 Desember.
- [6] Lev A. Ostrovsky, Alexander I. Potapov, 2002.*Modulated Waves: Theory and Application*,Europe: Johns Hopkins University Press.
- [7] Intelligent Energy Europe. *Ocean Energy: State of The Art*. Europe.
- [8] Meirovitch, Leonard., (2001). *Fundamental Of Vibration*, McGraw Hill, Singaapore.

- [9] Luluk., (2011). *Studi Eksperiment Dan Menganalisa Pengaruh Massa Bandul Terhadap Pola Gerak Bandul Dan Voltage Bangkitan Generator Pada Simulator Pembangkit Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandul Konis Ponton Datar.*

RIWAYAT HIDUP



Ibrahim AZ dilahirkan di Sorowako pada tanggal 20 April 1990. Penulis merupakan putra ketiga dari tujuh bersaudara.

Penulis memulai pendidikan dasar di SDN 610 Lioka dan lulus pada tahun 2002, lalu melanjutkan studi ke SMPN 1 Towuti dan lulus pada tahun 2005, kemudian penulis melanjutkan studi ke SMAN 1 Towuti dan lulus pada tahun 2008. Setelah masa studi SMA selesai, penulis melanjutkan studi program Diploma ke Akademi Teknik Sorowako pada jurusan Teknik Manufaktur dengan Program Studi Teknik Perawatan dan lulus pada tahun 2011. Pada tahun 2012 penulis melanjutkan program sarjana di jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan mengambil bidang studi Desain. Keinginan untuk selalu belajar dan mengamalkan ilmu yang didapat selama kuliah mendorong penulis untuk mengambil Tugas Akhir dengan judul “Rancang Bangun Dan Studi Eksperimen Respon Dinamis Model Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Pontoon Dengan Tiga Bandul”. Penulis memiliki harapan agar ilmu yang telah didapatkan dapat berguna untuk agama dan negara. Penulis dapat dihubungi melalui email dibawah ini:

eriendbram@yahoo.com